

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN  
TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**

TITULACIÓN DE GRADO EN GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

TRABAJO FIN DE GRADO



**FLUJO DE TRABAJO EN PROYECTOS DE  
MODELIZACIÓN 3D CON EQUIPOS LÁSER  
ESCÁNER**

**Madrid, Julio 2014**

**Alumno:**

Fabio Romeral Pérez

**Tutor:**

Mercedes Farjas Abadía

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quisiera agradecer la realización de este trabajo a mi tutora Mercedes Farjas Abadía por habérmelo propuesto y por hacer de él un proyecto dinámico y de gran interés,*

*a los profesores que cumplen con su trabajo y ayudan al alumno con su mejor intención y profesionalidad,*

*a mis compañeros de curso, porque entre todos hemos superado las dificultades que supone el proceso de cambio del plan de estudios,*

*a mis amigos, por seguir a mi lado pese a los cambios profesionales y personales que me han surgido a lo largo de los últimos años,*

*a mi familia, por apoyarme y ayudarme en estos tiempos tan difíciles para el desarrollo profesional y personal,*

*y sobre todo a Sofía, por ser mi apoyo incondicional y ayudarme siempre que lo he necesitado, por animarme siempre a dar un paso más, por ser la razón de mis esfuerzos y porque sin ella no hubiera llegado hasta aquí.*

## **TABLA DE CONTENIDO**

1. OBJETIVOS E INTRODUCCIÓN .....	7
1.1. Objetivo del trabajo .....	8
1.2. Introducción.....	9
1.2.1. Antecedentes .....	9
1.2.2. Historia del láser .....	9
1.2.3. Equipo láser escáner y escaneado láser .....	11
1.2.4. Aplicaciones del escaneado láser.....	12
1.3. Fundamentos del láser escáner .....	21
1.3.1. El espectro electromagnético y la luz .....	21
1.3.2. Láseres .....	22
1.3.3. Propiedades importantes de la luz láser .....	23
1.3.4. Seguridad láser.....	24
2. CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS LÁSER ESCÁNER.....	26
2.1. Clasificación por contacto .....	27
2.1.1. En contacto con el objeto.....	27
2.1.2. Sin contacto con el objeto .....	27
2.2. Clasificación por sistema de medida .....	28
2.2.1. Escáneres pasivos .....	29
2.2.1.1. Estereoscopios.....	29
2.2.1.2. Silueta .....	29
2.2.2. Escáneres activos .....	30
2.2.2.1. Medición basada en triangulación.....	30
2.2.2.2. Medición basada en tiempo.....	33
2.2.2.2.1. Escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo, detección incoherente) .....	33
2.2.2.2.2. Escáneres basados en la fase .....	37
2.2.2.2.3. Interferometría (coherente) .....	39
2.3. Clasificación por sistema de barrido.....	42
2.3.1. Cámara .....	42
2.3.2. Panorámica.....	42
2.3.3. Híbrido .....	42
2.4. Clasificación por posición .....	43
2.4.1. Equipos estáticos.....	43
2.4.2. Equipos dinámicos .....	43
2.5. Aspectos metrológicos: análisis de error .....	44
2.5.1. Errores instrumentales .....	44
2.5.2. Errores relacionados con los objetos.....	48
2.5.3. Condiciones ambientales .....	49
2.5.4. Errores metodológicos .....	51

2.6. Equipamiento, especificaciones técnicas y material auxiliar de un escáner láser .....	52
2.6.1. Equipamiento .....	52
2.6.2. Especificaciones técnicas.....	53
2.6.3. Accesorios.....	53
3. METODOLOGÍA .....	55
3.1. Visión general.....	56
3.2. Planificación .....	57
3.2.1. Determinar los objetivos del trabajo.....	57
3.2.2. Análisis del área a levantar .....	58
3.2.3. Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser.....	59
3.2.4. Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia .....	60
3.2.5. Gestión de los datos .....	62
3.3. Trabajo previo en campo .....	65
3.3.1. Preparación del levantamiento.....	65
3.3.2. Estacionamiento del escáner .....	65
3.3.3. Conexión del escáner .....	66
3.3.4. Ajustes del escáner.....	66
3.4. Toma de datos.....	70
3.4.1. Escaneado de un objeto o edificio .....	70
3.4.2. Escaneado de las dianas u otros puntos de referencia.....	70
3.4.3. Medición de puntos de referencia o dianas .....	71
3.4.4. Comprobación de la captura de datos .....	72
3.5. Preparación de datos.....	73
3.6. Registro y georreferenciación.....	74
3.6.1. Registro y georreferenciación indirectas .....	75
3.6.2. Registro y georreferenciación directas.....	77
3.6.3. Aspectos generales del registro y georreferenciación directa .....	78
3.7. Procesamiento de nubes de puntos 3D .....	79
3.7.1. Representación de las nubes de puntos .....	79
3.7.2. Mejora de los datos .....	81
3.7.3. Modelización 2D directa a partir de las nubes de puntos .....	82
3.7.4. Modelado 3D directo a partir de nubes de puntos .....	83
3.7.5. Modelado 3D de superficies complejas .....	83
3.7.6. Modelización 2D indirecta a partir de las nubes de puntos .....	85
3.7.7. Mapeado con textura.....	85
3.8. Control de calidad y entrega .....	88
4. CONCLUSIONES.....	90
5. PRESUPUESTO Y CRONOGRAMA.....	92
5.1. Presupuesto .....	93
5.2. Cronograma .....	95
6. BIBLIOGRAFÍA.....	97



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Esquema de un láser .....	10
Ilustración 2.	Esquema de un láser escáner .....	11
Ilustración 3.	Aplicaciones del láser escáner terrestre .....	12
Ilustración 4.	Láser escáner en Topografía.....	13
Ilustración 5.	Láser escáner en Geología y Minería .....	13
Ilustración 6.	Láser escáner para patrimonio cultural.....	14
Ilustración 7.	Láser escáner en obras civiles .....	15
Ilustración 8.	Láser escáner en industrias .....	16
Ilustración 9.	Láser escáner en incendios forestales.....	16
Ilustración 10.	Láser escáner para medición de volúmenes .....	17
Ilustración 11.	Láser escáner para evaluación de daños causados por terremotos .....	17
Ilustración 12.	Láser escáner para análisis de hundimientos.....	18
Ilustración 13.	Láser escáner aplicado a videojuegos.....	18
Ilustración 14.	Láser escáner móvil .....	19
Ilustración 15.	Láser escáner para torres eléctricas .....	19
Ilustración 16.	Láser escáner en Automoción .....	20
Ilustración 17.	Láser escáner en accidentes de tráfico.....	20
Ilustración 18.	La luz y su descomposición de ondas visibles .....	21
Ilustración 19.	El espectro electromagnético.....	21
Ilustración 20.	Escáner de contacto .....	27
Ilustración 21.	Clasificación de equipos láser escáner según su sistema de medida .....	28
Ilustración 22.	Estereoscopio.....	29
Ilustración 23.	Fundamentos matemáticos de la triangulación.....	30
Ilustración 24.	Esquema de un láser escáner .....	31
Ilustración 25.	Tipos de marcas láser para reconocimiento de puntos homólogos.....	32
Ilustración 26.	Proyección de un patrón de luz para escaneado 3D .....	32
Ilustración 27.	Patrón Moiré.....	33
Ilustración 28.	Esquema de un láser escáner de tiempo de vuelo.....	34
Ilustración 29.	Diferencia de pulsos láser.....	34
Ilustración 30.	Relación de la frecuencia del punto y el rango de certeza.....	35
Ilustración 31.	Métodos de desviación del haz en los escáneres de tiempo de vuelo.....	36
Ilustración 32.	Esquema de un láser escáner de fase .....	37
Ilustración 33.	Modulación de un escáner láser de fase .....	39
Ilustración 34.	Esquema de un interferómetro.....	39
Ilustración 35.	Esquema de escaneado con escáner de luz estructurada .....	41
Ilustración 36.	Sistemas de barrido en los equipos láser escáner .....	42
Ilustración 37.	Carro de medición de vías .....	43
Ilustración 38.	Reflexión gaussiana.....	44
Ilustración 39.	Problema del haz láser sobre bordes.....	45
Ilustración 40.	Relación de ambigüedad en la distancia en diferentes tipos de láser escáner.....	47
Ilustración 41.	Reflexión sobre una superficie lambertiana .....	48
Ilustración 42.	Relación de errores sobre superficies de diferente reflectividad .....	49

Ilustración 43.	Reflexión sobre una superficie de mármol .....	49
Ilustración 44.	Método general de trabajo con equipos láser escáner .....	56
Ilustración 45.	Planificación de trabajos con equipos láser escáner .....	57
Ilustración 46.	Estacionamiento del láser escáner .....	59
Ilustración 47.	Elipses de error en relación al ángulo de incidencia sobre la superficie a medir .....	60
Ilustración 48.	Posicionamiento de los puntos de referencia.....	61
Ilustración 49.	Ejemplos de puntos de referencia.....	62
Ilustración 50.	Estacionamiento del láser escáner sobre trípode .....	65
Ilustración 51.	Campo visual del láser escáner.....	66
Ilustración 52.	Relación de distancias y resoluciones .....	68
Ilustración 53.	Rango de puntos aceptables e inaceptables en la medida con láser escáner .....	69
Ilustración 54.	Diana sobre trípode.....	71
Ilustración 55.	Escaneado de alta resolución sobre diana.....	71
Ilustración 56.	Situación relativa de los estacionamientos .....	74
Ilustración 57.	Clasificación de las técnicas de registro .....	75
Ilustración 58.	Ejemplo de propagación de errores entre pares consecutivos de nubes de puntos .....	76
Ilustración 59.	Relación de las fases de procesamiento del escaneado y su grado de automatización.....	79
Ilustración 60.	Representación de una nube de puntos según el valor de su reflectividad .....	80
Ilustración 61.	Representación de una nube de puntos a partir de su mapa de profundidades .....	80
Ilustración 62.	Representación de una nube de puntos a partir de surfels .....	81
Ilustración 63.	Criterio de Delaunav.....	84
Ilustración 64.	Mapeado con textura .....	85
Ilustración 65.	Proyección ortogonal de texturas .....	86
Ilustración 66.	Proceso de control de calidad de los levantamientos con láser escáner .....	89
Ilustración 67.	Diagrama de Gantt.....	96

# **1. OJETIVOS E INTRODUCCIÓN**

## **1.1. OBJETIVO DEL TRABAJO**

La introducción de las nuevas tecnologías al ámbito del profesional en Topografía requiere una actualización constante de conocimientos, ya que éstas van modificando el instrumental y la metodología para proporcionar mejores posibilidades a la hora de adquirir, procesar y presentar información espacial.

La medición con equipos láser escáner es actualmente una de las vías que más se está desarrollando, por lo que se hace necesario saber qué son, cómo funcionan, qué tipos hay y cuál es su metodología de trabajo.

Los levantamientos topográficos que se realizan con instrumentos de medición del tipo láser escáner requieren de unos procesos de tratamiento de la información que difieren de los que se realizan tradicionalmente en un proyecto de cartografía. Es por esto por lo que se hace necesario dar a conocer dichos procesos para completar las competencias propias del graduado en Geomática y Topografía.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) es definir y describir de manera clara y ordenada el procedimiento a seguir en el desarrollo de un trabajo con equipos láser escáner 3D, de tal manera que el lector sea capaz además de entender cómo funcionan, por qué son necesarios y cuáles podrían ser sus aplicaciones. El resultado pretende mostrar el protocolo general de trabajo de tal manera que sirva de apoyo para el profesional en la materia.

## **1.2. INTRODUCCIÓN**

### **1.2.1. Antecedentes**

En el proceso de documentación geométrica de objetos, se cuenta actualmente con herramientas de gran precisión, que han permitido agilizar el registro de datos, maximizar la información obtenida y conseguir resultados que aportan una representación cada vez más fiel a la realidad.

Aunque la mayor parte de los resultados gráficos obtenidos en los procesos de documentación geométrica se orientan a representaciones 2D, cada vez se hace más necesario obtener un registro en 3D para obtener un modelo tridimensional que represente la geometría del objeto. Estos modelos tridimensionales son necesarios en distintos campos, y gracias a la tecnología láser escáner se pueden obtener de forma más rápida y precisa que con las metodologías anteriores (levantamientos topográficos y fotogrametría). La tecnología láser escáner ha dejado de ser una tecnología novedosa para convertirse en una herramienta contrastada cara y con problemas en el tratamiento de la información.

En el campo de la arqueología y del patrimonio cultural la tecnología láser escáner ha supuesto un gran avance gracias al registro de información de manera rápida y exhaustiva, permitiendo la evaluación de yacimientos con un alto grado de información fácilmente almacenable y facilitando su divulgación científica. Una característica muy importante de esta tecnología en este campo es la posibilidad de realizar el registro geométrico de objetos arqueológicos sin necesidad de contacto, y un gran avance en las tareas de rehabilitación y reconstrucción.

En cuanto a la ingeniería y arquitectura, esta tecnología tardó más tiempo en utilizarse de forma habitual, pero en la actualidad es la disciplina en la que mayor empleo se le está dando. Las posibilidades son enormes, desde la fabricación de pequeñas piezas industriales, hasta el registro geométrico de superestructuras de ingeniería para su ejecución y control posterior.

En la actualidad, las tecnologías láser escáner están demostrando un avanzado ritmo de crecimiento, tanto en instrumental, como en metodologías de trabajo y software de tratamiento de datos, que permiten un gran abanico de posibilidades para la obtención de modelos tridimensionales de cualquier tipo.

### **1.2.2. Historia del láser**

La historia del láser se remonta al año de 1916, cuando Albert Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada en los átomos, según el cual un átomo que recibe luz de la misma longitud de onda de la que puede emitir, es estimulado a emitirla en ese instante.

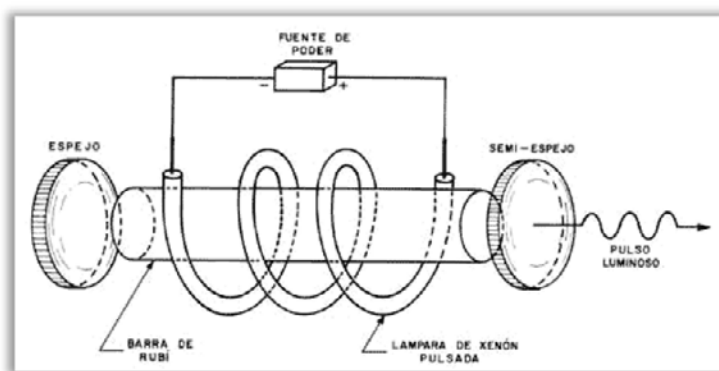
El siguiente trabajo fundamental para la evolución posterior del láser fue el del bombeo óptico, desarrollado a principios de la década de los cincuenta por Alfred Kastler (1902-1984), nacido en Guewiller, Alsacia, y educado en Colmar, entonces posesión alemana. El trabajo de Kastler sobre el bombeo óptico, basado en técnicas de resonancia ópticas, fue desarrollado con la colaboración de su alumno Jean Brossel, de la École Normale Supérieure de París, y fructificó con el

descubrimiento de métodos para subir el nivel energético de los átomos; dicho de otro modo, métodos para que los electrones de los átomos suban al nivel deseado, utilizando efectos de resonancia óptica. Estos métodos recibieron el nombre de bombeo óptico por el mismo Kastler, quien mereció el premio Nobel de física en 1966.

Charles H. Townes en 1951 se encontraba muy preocupado por encontrar un método para producir ondas de radio de longitud de onda muy corta, del orden de milímetros, y se le ocurrió un método para producir microondas usando el fenómeno de la emisión estimulada, basándose en la predicción de Einstein y en los estudios sobre bombeo óptico que realizó Alfred Kastler. La comprobación de su idea se la propuso como trabajo de tesis doctoral a su alumno James P. Gordon, en la Universidad de Columbia. Les costó tres años construir, con la colaboración de Herbert Zeiger, un dispositivo que amplificaba microondas mediante emisión estimulada, al que llamaron máser.

En septiembre de 1957, Townes, junto con Arthur Schawlow, comenzaron a pensar en el problema de construir ahora otro dispositivo similar al máser, pero que emitiera luz en lugar de microondas. Es interesante conocer la anécdota de que Townes solicitó una patente para artefactos que emitieran luz por el mecanismo de emisión estimulada, y de que poco después lo hizo también otro investigador de la misma Universidad de Columbia, llamado Gordon Gould, reclamando prioridad. Hay algunos que creen que Gould tenía razón. Lo cierto es que nadie niega que se hicieran algunos descubrimientos similares. Hasta la fecha sigue el pleito legal sobre quién tiene la razón.

Finalmente, Theodore H. Maiman logró construir el láser en 1960 en los laboratorios de investigación de la compañía aérea Hughes, en Malibu, California.



*Ilustración 1. Esquema de un láser.*

### 1.2.3. Equipo láser escáner y escaneado láser

Un equipo láser escáner consta de dos componentes básicos: un dispositivo de medida de distancias y un mecanismo de barrido (que es un sistema motorizado de espejos que desvía el láser en las direcciones vertical y horizontal). Esta tecnología láser escáner es capaz de medir distancias de una gran cantidad de puntos, y al mismo tiempo ángulos y además el valor de la reflectancia de las distintas superficies impactadas por el láser. Con los valores angulares y las distancias se podrán calcular las coordenadas tridimensionales ( $x, y, z$ ) de cada uno de los puntos medidos.

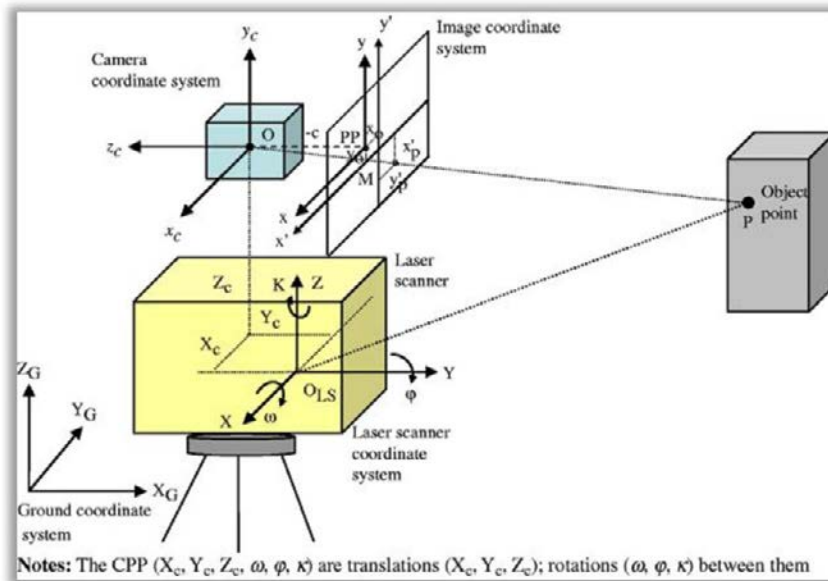


Ilustración 2. Esquema de un láser escáner.

El escaneado láser describe el método mediante el cual una superficie se muestrea o se escanea usando tecnología láser. Se analiza un entorno u objeto real para tomar datos sobre su forma y, posiblemente, su apariencia (por ejemplo el color). Los datos capturados pueden ser usados más tarde para realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales o modelos tridimensionales útiles en una gran variedad de aplicaciones.

Mediante el escaneado láser obtenemos una nube de puntos, que será procesada mediante un software para poder generar el modelo tridimensional del objeto escaneado.

La ventaja del escaneado láser es el hecho de que puede tomar una gran cantidad de puntos con una alta precisión en un periodo de tiempo relativamente corto. Es como tomar una fotografía con información de profundidad. Y al igual que en el caso de la fotografía, los escáneres láser son instrumentos de línea de vista. Por tanto, es necesario realizar múltiples capturas desde diferentes estaciones para garantizar una cobertura completa de una estructura.

Los escáneres 3D son distintos a las cámaras fotográficas, ya que estas últimas reúnen información del color sobre la superficie mientras que los escáneres 3D reúnen información acerca de su geometría, es decir, que obtienen la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado.

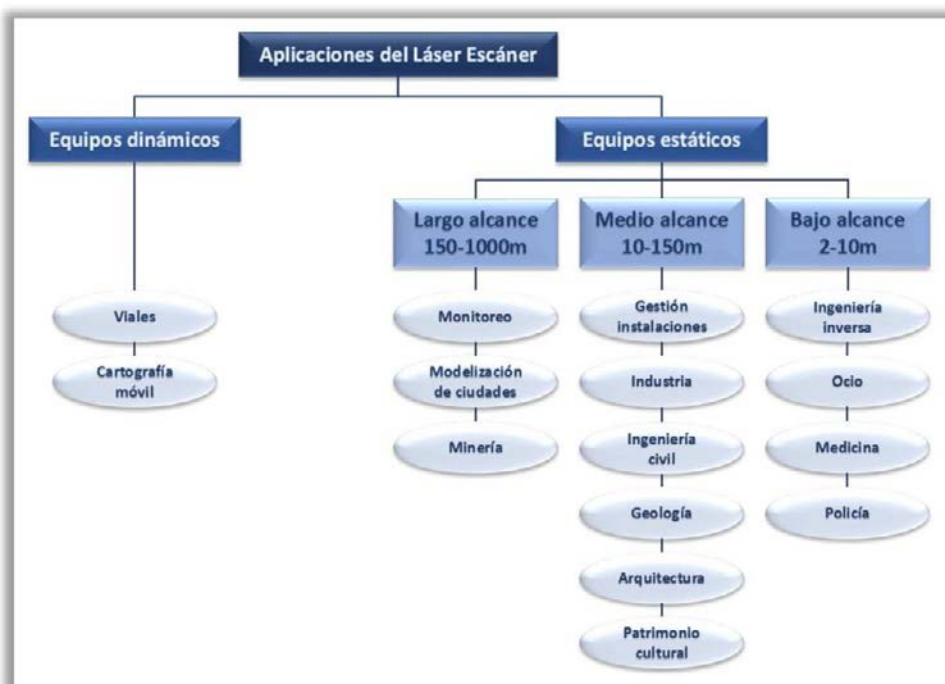
La desventaja del escaneado láser es que precisa de la estación total para georreferenciar los modelos y para realizar el control de calidad pertinente (la unión de escaneados va acumulando errores).

#### **1.2.4. Aplicaciones del escaneado láser**

En un principio, los escáneres láser eran de corto alcance y se utilizaban principalmente en el diseño automatizado e industrial para facilitar el Diseño Asistido por Ordenador (CAD). Esto contribuyó a la producción en masa de productos de consumo.

Sin embargo se ha ido aplicando a otros campos como consecuencia de la constante evolución tecnológica que se está produciendo. Los escáneres láser de medio alcance fueron desarrollados para la industria petroquímica. Debido a la complejidad de sus plantas, que sólo estaban documentadas con planos en dos dimensiones, la aparición de los escáneres láser permitió la gestión completa de las instalaciones en tres dimensiones.

Otras disciplinas como el patrimonio cultural, la arquitectura, el desarrollo urbanístico, la medicina forense y la industria del entretenimiento han adoptado esta tecnología gracias a las ventajas obvias del láser escáner: la inexistencia de contacto en las mediciones, la alta precisión, el largo alcance, la rápida adquisición, etc.



*Ilustración 3. Aplicaciones del láser escáner terrestre.*



## **- Topografía**

La tecnología láser escáner se utiliza dentro del campo de la topografía de manera que agiliza el proceso de recogida de datos. Por ejemplo, el láser escáner se puede utilizar en los denominados levantamientos topográficos de alta definición, que consisten en una captura de información rápida, detallada y precisa de una superficie o volumen. El equipo láser escáner realiza un barrido de la superficie captando miles de puntos por segundo y obteniendo una nube de puntos 3D compuesta por cientos de miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas (x, y, z) que componen un modelo tridimensional de los objetos registrados.



*Ilustración 4. Láser escáner en Topografía.*

## **- Geología y Minería**

El escaneado láser de afloramientos geológicos es una poderosa herramienta para recoger información relacionada con la geometría de superficies complejas, de manera que se puede matematizar y analizar rigurosamente la geometría de algunas superficies que han sido deformadas por procesos geológicos en las rocas. También permite obtener información de calidad de lugares inaccesibles como un acantilado.



*Ilustración 5. Láser escáner en Geología y Minería.*

Dentro de la minería también se suele utilizar el láser escáner en los siguientes casos:

- Topografía de explotaciones a cielo abierto.
- Topografía de explotaciones en interior. Cámaras y pilares, grandes huecos.
- Cubicaciones de volúmenes de material, en avance de excavación y en stocks y acopios irregulares.
- Topografía de zonas inestables, deslizadas y con taludes. Zonas problemáticas y de acceso difícil.
- Topografía para su actualización del avance de los frentes y cubicación periódica de explotaciones.
- Simulaciones virtuales para zonas restauradas en estudios de impacto.
- Espacios subterráneos mineros para depósitos de residuos.

- **Patrimonio cultural**

Esta tecnología es ideal para la documentación de edificaciones, monumentos y lugares históricos con detalle y gran precisión, generando nubes de puntos de 360° de las superficies escaneadas para crear modelos 3D que se emplean posteriormente en la restauración o en planes de conservación histórica. Características como la medición sin contacto y la nula alteración del objeto analizado hace que en determinadas ocasiones esta tecnología sea la única alternativa posible.



*Ilustración 6. Láser escáner para patrimonio cultural.*

## **- Obras civiles e infraestructuras**

Los equipos láser escáner se utilizan dentro de este ámbito para:

- Topografía de avances de obra, control de calidad y mediciones en las certificaciones.
- Cartografía y modelización de obras e infraestructuras.
- Control de la geometría en la excavación de túneles y cubicación de los volúmenes de relleno de hormigón.
- Control de geometría y deformaciones en obras e infraestructuras.
- Topografía de vertederos y actualización periódica de cubicaciones.



*Ilustración 7. Láser escáner en obras civiles.*

## **- Plantas industriales**

El escaneado láser permite obtener modelos tridimensionales muy precisos de estructuras y componentes de instalaciones industriales.

Los modelos “as built” representan el estado real de la instalación en el momento de estudio por lo que resultan muy útiles para la planificación de trabajos, la formación de personal y la simulación de maniobras, especialmente en zonas de difícil acceso o en condiciones ambientales severas. Los modelos pueden exportarse a programas de diseño tipo CAD o bien a archivos con formato \*.pdt para los que no se necesita formación específica.

Gracias al trabajo de topografía previo se pueden referir todos los elementos escaneados a un sistema de coordenadas común e integrado. De esta forma, se obtienen visualizadores panorámicos en entornos web que permiten moverse en el entorno real de la planta, identificar componentes, obtener coordenadas, medir distancias en tres dimensiones e identificar interferencias sin necesidad de estar físicamente en la zona de trabajo.



*Ilustración 8. Láser escáner en industrias.*

#### **- Prevención de incendios**

La tecnología láser escáner puede ser una herramienta muy importante en la prevención de incendios. Se realiza el escaneado de un escenario donde se ha producido un incendio obteniendo la nube de puntos 3D y posteriormente se traslada a un programa de simulación de incendios para poder investigar el comportamiento de los incendios (la transferencia de calor por radiación y convección, la pirolisis de la combustión de un material, el crecimiento del incendio, y la propagación de las llamas).



*Ilustración 9. Láser escáner en incendios forestales.*

#### **- Medición de volúmenes en canteras**

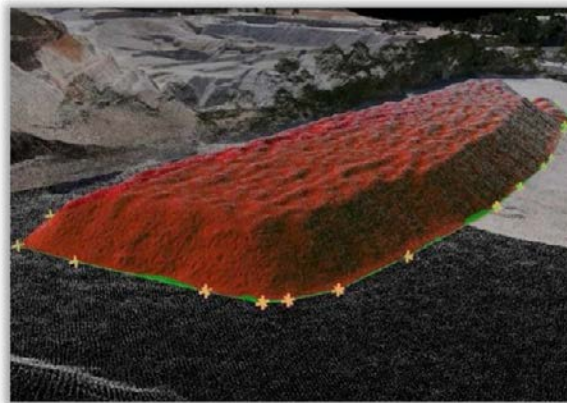
La medición de volúmenes en canteras, es un problema que tradicionalmente ha sido abordado mediante topografía tradicional; es una labor de elevado coste que debe realizarse inevitablemente con continuidad a lo largo de la explotación.

La aparición del equipo láser escáner ha significado la posibilidad de realizar estas mediciones con una rapidez antes inalcanzable, y sobre todo, con una precisión incomparablemente más alta que la proporcionada por los medios topográficos clásicos.



La utilización de nubes de puntos para el estudio de taludes, o derribos provocados por la explotación de este tipo de recintos, ofrece la posibilidad de una recreación tridimensional, con precisión centimétrica, de la que podremos extraer, tanto volúmenes como secciones en cualquier dirección del espacio para su posterior uso mediante programas de topografía.

El uso de escáner láser tridimensional multiplica los puntos monitorizados, de forma que en lugar de basar el cálculo de volumen en unos pocos miles de puntos se pasa a hacerlo en varias decenas de millones dependiendo de la extensión del recinto, llegándose sin dificultad a precisiones en el cómputo superiores al 95%.



*Ilustración 10. Láser escáner para medición de volúmenes.*

#### **- Temblores y terremotos**

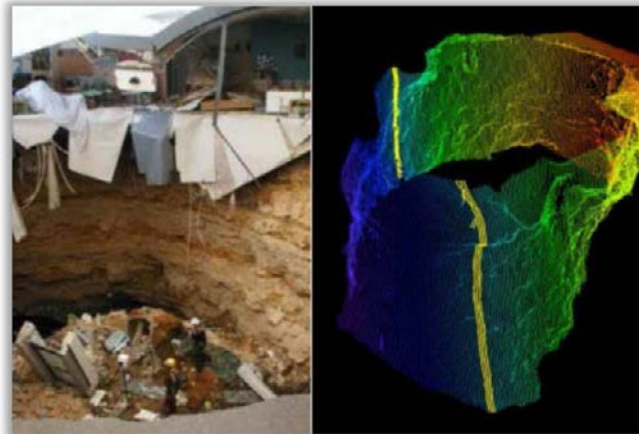
Con el fin de restablecer lo más rápido posible los daños provocados en las infraestructuras ferroviarias, carreteras y edificios, el escaneo láser 3D se impone como la herramienta de análisis más rápida y eficaz. Los resultados obtenidos permiten al mismo tiempo preparar las reparaciones necesarias con los programas informáticos actuales, y afinar los resultados de las simulaciones teóricas al compararlos con los resultados reales levantados en campo.



*Ilustración 11. Láser escáner para evaluación de daños causados por terremotos.*

### **- Derrumbes y hundimientos**

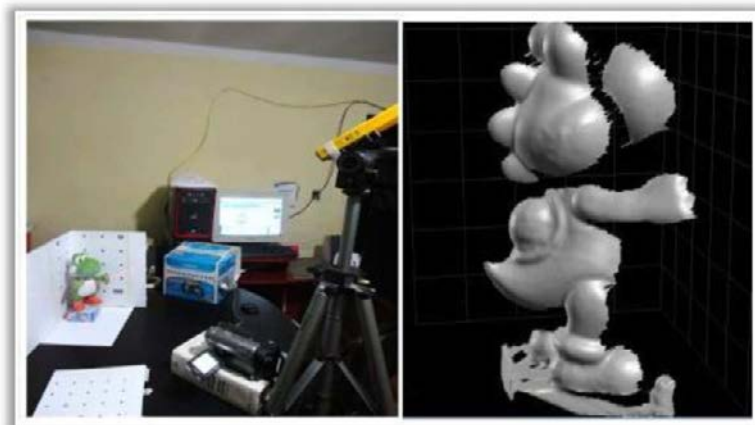
Cuando sucede un derrumbe por ejemplo en las obras de un nuevo túnel, si se realiza un escaneado después del accidente el modelo digital que se obtiene permite a los diferentes expertos (geólogos, constructores y empresarios) a analizar cuales pudieron ser las causas del derrumbe.



*Ilustración 12. Láser escáner para análisis de hundimientos.*

### **- Entretenimiento**

Los escáneres 3D son usados por la industria del entretenimiento para crear los modelos 3D digitales para películas y videojuegos. En caso de que exista en el mundo real el objeto cuyo modelo se quiere escanear, es mucho más rápido escanear el objeto físico que crear manualmente el modelo 3D por medio de software de modelado.



*Ilustración 13. Láser escáner aplicado a videojuegos.*

### **- Catastro**

El montaje de escáneres de alta velocidad sobre plataformas móviles, está creando una verdadera revolución en los levantamientos topográficos aplicados a la viabilidad y al catastro. El equipo compuesto por dos escáneres montados sobre los laterales del techo de un vehículo, con cámaras digitales, toman una película al mismo tiempo que los escáneres barren y guardan las nubes de puntos.

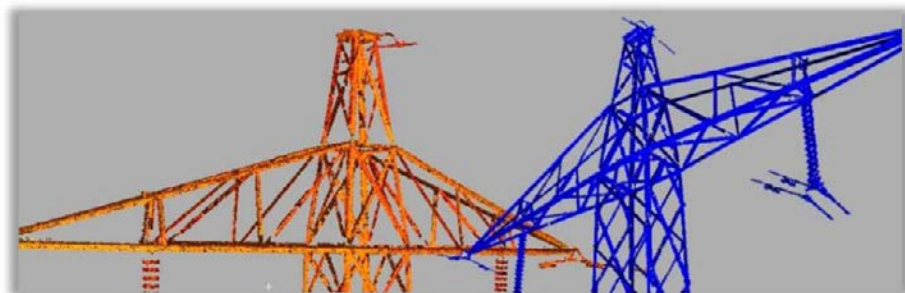
En el ámbito del catastro, después de una simple pasada por las calles o avenidas, tendremos el levantamiento de fachadas en tiempo casi real, y posteriormente en el post proceso, se asignan parcelas con sus códigos correspondientes y su exportación al Sistema de Información Geográfica o SIG.



*Ilustración 14. Láser escáner móvil.*

### **- Subestaciones y líneas eléctricas**

Otra aplicación usual del láser escáner es en los corredores para líneas eléctricas y subestaciones eléctricas. Con la tecnología láser se pueden registrar y discriminar los objetos de interés aplicando pseudocolores a los mismos, tanto con detalles del terreno como con detalles de la vía, árboles y torres eléctricas.



*Ilustración 15. Láser escáner para torres eléctricas.*

### **- Automoción e ingeniería aeroespacial**

En estas aplicaciones en las que la “ingeniería inversa” tiene una gran presencia, es indispensable la obtención de información rápida y precisa para la creación de diseños a partir de productos ya fabricados. La tecnología láser escáner permite la creación de prototipos, análisis de piezas, comprobación de modelos, etc., aportando una herramienta muy eficaz en los controles de calidad de cualquier producto.



*Ilustración 16. Láser escáner en Automoción.*

### **- Estudios forenses y accidentes**

Desde un simple accidente de tráfico, hasta un levantamiento completo de la escena de un accidente aéreo, el equipo láser escáner aporta un registro geométrico prácticamente exhaustivo de los hechos ocurridos en un instante preciso, pudiendo llegar a crear una simulación del suceso.



*Ilustración 17. Láser escáner en accidentes de tráfico.*

En el caso de la escena de un crimen, se necesita documentar todo el escenario de forma urgente para evitar su deterioro y la pérdida de información. Con esta documentación tridimensional, los forenses pueden examinar la escena en busca de líneas de visión o trayectorias de bala.



### 1.3. FUNDAMENTOS DEL LÁSER ESCÁNER

#### 1.3.1. El espectro electromagnético y la luz

El espectro electromagnético nos es más familiar de lo que podría pensarse. Las microondas que utilizamos para calentar la comida y el teléfono móvil por ejemplo utilizan partes del espectro electromagnético. La razón por la que vemos los objetos es porque emiten, reflejan o transmiten una parte de la franja visible del espectro que llamamos luz. Esta parte visible del espectro electromagnético está compuesta por los colores que podemos ver en el arco iris (desde los rojos y naranjas hasta los azules y violetas).

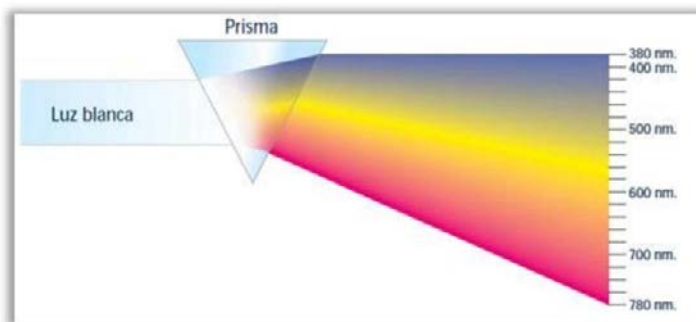


Ilustración 18. La luz y su descomposición de ondas visibles.

Cada uno de los colores corresponde a una longitud de onda diferente. Esto se puede observar si hacemos pasar luz blanca a través de un prisma de vidrio. La luz violeta es desviada –refractada– más que la roja debido a que tienen una longitud de onda más corta, y es por ello por lo que vemos el efecto del arco iris.

Las longitudes de onda del espectro electromagnético varían desde las ondas largas de radio (del tamaño de edificios) hasta los cortos rayos gamma más pequeños que el núcleo de un átomo.

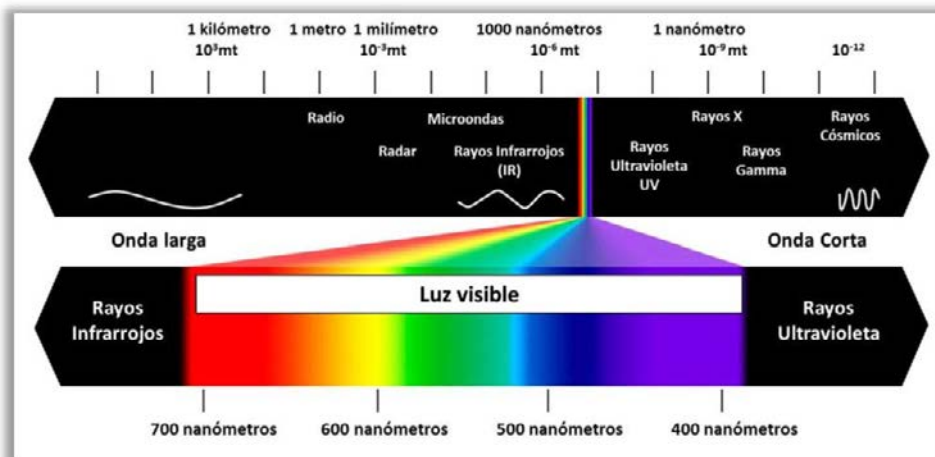


Ilustración 19. El espectro electromagnético.

El espectro electromagnético se puede expresar en términos de energía, longitud de onda o frecuencia. Estas magnitudes están relacionadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$c = v \cdot \lambda$$
$$E = h \cdot v = \frac{c}{\lambda}$$

donde:

- $c$  es la velocidad de la luz, 299.792.458 m/s.
- $h$  es la constante de Planck,  $6.626069 \cdot 10^{-34}$  J·s.
- $v$  representa la frecuencia y  $\lambda$  la longitud de onda.

De este modo, las frecuencias altas del espectro tienen longitudes de onda cortas y energía alta y viceversa.

### **1.3.2. Láseres**

A un instrumento que sea capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro se le llama láser. Un láser típico emite luz en un estrecho y poco divergente haz de longitud de onda bien definida (correspondiente a un color particular si el láser opera en el espectro visible). Esto contrasta con otra fuente de luz como la bombilla incandescente, que emite luz con una gran abertura y con un amplio espectro de longitudes de onda, lo que hace que veamos la luz de la bombilla de color blanco y no sólo en una única dirección. Estas propiedades se pueden resumir con el término coherencia.

Realmente, los láseres son similares a los transistores: generan o amplifican luz al igual que los transistores generan o amplifican señales electrónicas de audio, radio o frecuencias de microondas. La palabra láser es el acrónimo en inglés de las palabras amplificación de la luz por emisión inducida de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Actualmente, los láseres se usan en la vida diaria, especialmente en los dispositivos de almacenamiento óptico como los reproductores de CD y DVD, en los cuales el láser escanea la superficie del disco para la lectura de los datos. Otras aplicaciones comunes del láser son los lectores de los códigos de barras y, obviamente, los punteros láser. En la industria, los láseres se usan para cortar el acero y otros metales y para grabar estampados como por ejemplo las letras en los teclados de ordenador. También se utilizan en aplicaciones médicas y militares.

### **1.3.3. Propiedades importantes de la luz láser**

La luz láser es simplemente luz generada mediante un instrumento láser. Esta luz tiene algunas propiedades muy especiales que la distinguen de la luz proveniente de otras fuentes:

- La luz láser se genera en forma de haz láser. Este haz tiene un alto (a veces extremadamente alto) grado de coherencia espacial, por lo tanto se propaga en una dirección bien definida con un haz moderadamente divergente. El término coherencia hace referencia a que la señal eléctrica guarda una relación de fase constante en diferentes puntos a lo largo del haz. Esta coherencia es la razón por la que un haz láser se puede propagar a lo largo de largas distancias y se focaliza produciendo manchas de luz muy pequeñas.
- La luz láser también tiene un alto grado de coherencia temporal (en la mayoría de los casos), lo que equivale a una longitud de coherencia larga. Longitudes de coherencia largas implican una rígida relación de fase a través de intervalos de tiempo relativamente largos, correspondientes a largas distancias de propagación (a menudo algunos kilómetros).
- Se obtiene un ancho de banda espectral (o ancho de línea) estrecho combinando una coherencia temporal grande con un tiempo de coherencia grande. Esto significa que los haces de láser visible tienen un cierto color puro, por ejemplo rojo, verde o azul, pero no blanco o magenta. Por ejemplo, la mayoría de los láseres usados en mediciones cortas y medias tienen una longitud de onda de 1064 nm (infrarrojo cercano) o 532 nm (láser verde). Es destacable que una longitud de coherencia larga introduce una tendencia al fenómeno del ruido del láser, es decir, que se puede observar un patrón granular característico. Este efecto se puede observar cuando un haz láser incide en una superficie metálica.
- En la mayoría de casos, la luz láser está polarizada linealmente. Esto significa que el campo eléctrico oscila en una dirección espacial particular.

La luz láser puede tener otras propiedades destacables en función de la aplicación:

- La luz láser puede ser visible, pero la mayoría de láseres emiten en otras regiones del espectro, particularmente en el infrarrojo cercano, que el ojo humano no puede percibir.
- La luz láser no siempre es continua, pero puede ser emitida en forma de pulsos cortos o ultra cortos. Como consecuencia de esto, los máximos de potencia pueden ser extremadamente altos.

Los haces de láser permanecen enfocados cuando se proyectan sobre un escenario lejano gracias a las propiedades de coherencia. Otra propiedad fundamental de las ondas de luz láser es su velocidad de propagación. La luz viaja con una velocidad finita y constante en un determinado medio. Como consecuencia de estas propiedades, la luz láser es muy adecuada para la medición de objetos.

#### **1.3.4. Seguridad láser**

El láser se usa en una amplia variedad de aplicaciones, entre las que encontramos aplicaciones científicas, militares, medicina y el comercio, todos ellos desarrollados desde la invención del láser en 1958. La coherencia, la alta monocromaticidad, y la capacidad de alcanzar potencias extremas son propiedades que permiten utilizarlo en estas aplicaciones especializadas. Por tanto, la luz láser debe ser manejada con una precaución extrema y se estima fundamental conocer los diferentes tipos de láser.

Para permitir a los usuarios que determinen el riesgo potencial, todos los láseres e instrumentos que hacen uso del láser están etiquetados y clasificados dependiendo de la longitud de onda y de la potencia de energía que produce el láser. El estándar europeo IEC 60825-1 proporciona información sobre las distintas clases y precauciones asociadas. Se describen siete clases de láser:

- Clase 1. Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos para visión intrahaz.
- Clase 1M. Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero pueden ser peligrosos si se emplean lentes con el haz.
- Clase 2. Láseres que normalmente producen un reflejo ciego para proteger al ojo. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección en condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso instrumentos ópticos con visión intrahaz.
- Clase 2M. Láseres que normalmente producen un reflejo ciego para proteger al ojo. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección en condiciones de utilización razonablemente previsibles. Sin embargo, la visión de la salida del haz pueden ser peligrosa si el usuario emplea lentes con el haz.
- Clase 3R. Láseres potencialmente peligrosos cuando se produce visión directa intrahaz, aunque el riesgo es menor que en el caso de láseres de la Clase 3B.
- Clase 3B. Normalmente son peligrosos si ocurre exposición directa intrahaz, aunque la visión de reflexiones difusas es normalmente segura. Generalmente, esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo.
- Clase 4. Si se observan directamente causarán daños en los ojos o en la piel. Los láseres de esta clase también pueden producir reflexiones peligrosas. Esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo.

Los usuarios de sistemas de escaneado láser deben ser siempre conscientes de la clase de su instrumento. Particularmente, el usuario debe asegurarse que se está utilizando la clasificación correcta. (Véase al estándar IEC para más información sobre seguridad láser).

Precauciones particulares y procedimientos a tener en cuenta en topografía, alineación y nivelación se describen en el estándar IEC para los productos con láser Clase 1M, Clase 2M y Clase 3R. Estas precauciones relevantes para los escaneados láser son:

- Sólo el personal cualificado y preparado debe ser asignado para instalar, ajustar y utilizar el equipamiento láser.
- Las áreas donde se utiliza estos láseres deberían estar señalizadas con la señal de advertencia apropiada.
- Deberían tomarse precauciones para asegurar que el personal no mira al haz (de manera prolongada e intrahaz ya que puede ser peligroso). La visión directa del haz a través de instrumentos ópticos (teodolitos, etc.) también puede ser peligrosa.
- Deberían tomarse precauciones para garantizar que el haz láser no se dirige a superficies especulares tipo espejo de manera intencionada.
- Cuando el equipo láser no esté en uso debe guardarse en un sitio donde el personal no autorizado no tenga acceso.
- Debe utilizarse equipamiento láser especial a prueba de explosiones en entornos con peligro potencial de explosión (p. ej. plantas petroquímicas, minas). Las propiedades de este equipamiento son: el máximo de potencia del láser y la temperatura máxima deberían estar limitados. Además, que no produzca chispas.

## **2. CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS LÁSER ESCÁNER**

## **2.1. CLASIFICACIÓN POR CONTACTO**

### **2.1.1. En contacto con el objeto**

Este tipo de escáneres examinan el modelo mediante toques físicos sobre el objeto, es decir, cada toque en el objeto corresponde con un punto del modelo. Con este tipo de escáneres se obtienen modelos muy precisos, por lo que se suelen utilizar para fabricar piezas. Alguno de los inconvenientes de este tipo de escáneres son que puede dañar el objeto escaneado al tocarlo y que su velocidad de escaneado es lento en comparación con otro tipo de escáneres.



*Ilustración 20. Escáner de contacto.*

### **2.1.2. Sin contacto con el objeto**

Este tipo de escáneres funcionan de manera que no llegan a tocar el objeto escaneado físicamente, sino que utilizan algún tipo de radiación como puede ser la luz (láser, infrarroja, natural) o el ultrasonido, entre otros. Éste es el caso de los escáneres que vamos a tratar y los cuales vamos a clasificar.

## 2.2. CLASIFICACIÓN POR SISTEMA DE MEDIDA

Debido a los recientes desarrollos en la visión por ordenador y la tecnología de sensores, la luz se ha utilizado de varias maneras para medir objetos. Estas técnicas de medición se pueden dividir en dos categorías: técnicas activas y pasivas.

Las técnicas pasivas no emiten radiación alguna, pero en cambio se basan en detectar la radiación ambiental reflejada. La mayoría de escáneres de este tipo detectan la luz visible porque es una radiación ambiental fácilmente disponible. Otros tipos de radiación, como el infrarrojo también puede ser usado. Los métodos pasivos pueden ser muy baratos porque en la mayoría de los casos no necesitan más hardware que una cámara digital. El problema con estas técnicas es que dependen de encontrar correspondencias entre imágenes 2D, lo que no siempre tiene una única solución. Por ejemplo, patrones repetitivos tienden a producir errores. La precisión de estos métodos depende mayoritariamente de la resolución de las imágenes y de la densidad de elementos identificables en ellas.

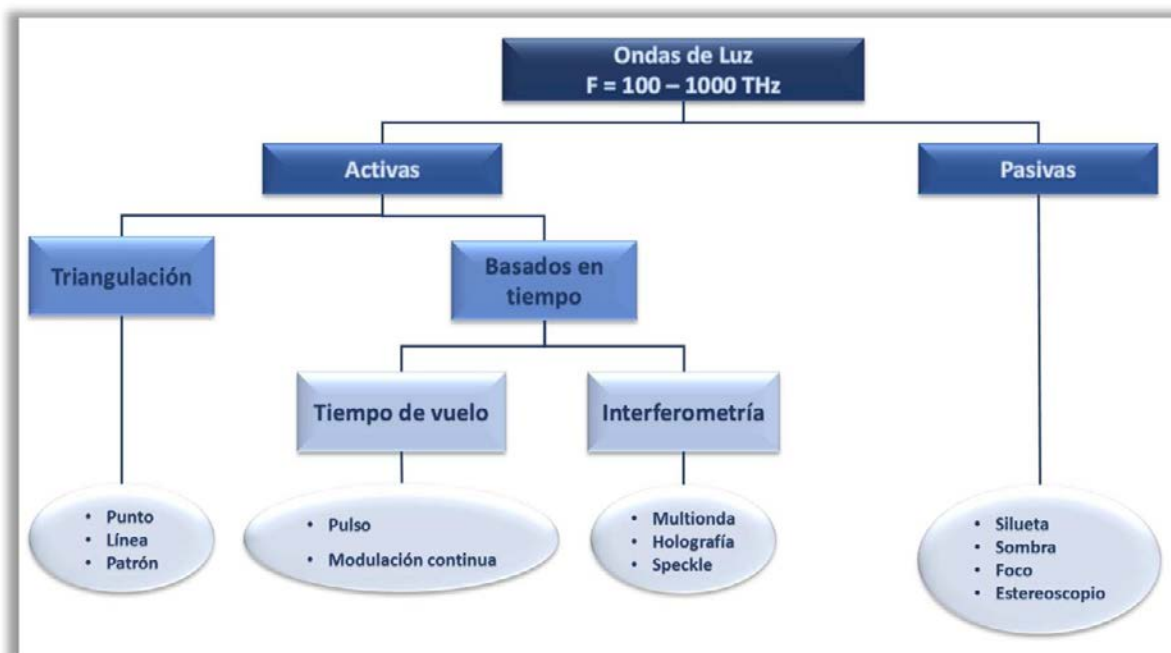


Ilustración 21. Clasificación de equipos láser escáner según su sistema de medida.

Los escáneres activos emiten algún tipo de radiación controlada y detectan su reflexión con el fin de sondear un objeto o un entorno. Los posibles tipos de radiación utilizados incluyen la luz, los ultrasonidos o los rayos X. Como estas técnicas de medición activa requieren un transmisor láser y un receptor son mecánicamente más complejos que las técnicas pasivas. Las principales ventajas de estos sistemas son:

- No requieren luz ambiental, porque ellos generan su propia radiación.
- Proporcionan gran cantidad de mediciones de manera automática.
- Se pueden utilizar en superficies sin rasgos distintivos.
- Capturan mucha información en poco tiempo (1000-500.000 ptos/s).



Sin embargo, algunos sistemas activos pueden verse afectados por fuentes de luz externas, reflectividad, color y rugosidad.

Existe un número de escáneres activos, diferenciándose todos ellos en la manera en la que el escáner recibe y/o analiza la señal de radiación reflejada.

### **2.2.1. Escáneres pasivos**

#### **- Estereoscopios**

Los sistemas estereoscópicos emplean generalmente dos cámaras de video, levemente separadas, examinando la misma escena. Analizando las diferencias entre las imágenes capturadas por cada cámara, es posible determinar la distancia de cada punto en las imágenes. Este método se basa en la visión estereoscópica humana.



*Ilustración 22. Estereoscopio.*

#### **- Silueta**

Este tipo de escáneres 3D usan bosquejos creados de una sucesión de fotografías alrededor de un objeto tridimensional contra un fondo muy bien contrastado. Estas siluetas se estiran y se cruzan para formar la aproximación visual hull (es una entidad geométrica creada por la técnica de la forma de la silueta de la reconstrucción 3D) del objeto. Esta clase de técnicas no son capaces de detectar algunas concavidades de un objeto (como el interior de un tazón).

### 2.2.2. Escáneres activos

En la práctica, el método de triangulación activa fue inventado para solucionar el notable problema de correspondencia encontrado en las técnicas de medición pasiva. El problema de correspondencia se puede establecer de la siguiente manera: dadas dos imágenes, I1 e I2, de una escena tomada desde dos puntos de vista, la orientación relativa de las cámaras y un par de puntos homólogos entre las dos imágenes, se puede calcular el correspondiente punto en 3D usando el principio de triangulación. De este modo, el problema de correspondencia consiste en encontrar pares de puntos homólogos en diferentes imágenes. El método de triangulación activa usa la luz del láser para solucionar este problema marcando el punto del objeto con el color de la luz del láser. De este modo, el haz puede ser detectado fácilmente en la imagen. Por ello estos escáneres suelen denominarse como de triangulación óptica.

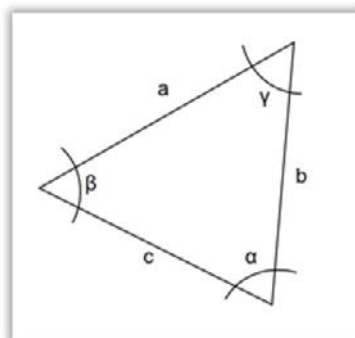
#### 2.2.2.1. Medición basada en triangulación

Los triángulos son la base de muchas técnicas de medición. Se utilizaron en mediciones geodésicas básicas en la Grecia antigua y todavía pueden encontrarse en las modernas cámaras 3D basadas en láser. Los fundamentos matemáticos del triángulo (trigonometría), que son la base de las técnicas de medición por triangulación, han sido atribuidos al filósofo griego Thales (siglo VI A.C.):

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos(\alpha)$$

$$c = a \cdot \cos(\beta) + b \cdot \cos(\alpha)$$



*Ilustración 23. Fundamentos matemáticos de la triangulación.*

Un escáner láser por triangulación utiliza este mismo principio para investigar el entorno. Se dirige un patrón láser sobre el objeto y se emplea una cámara para buscar la localización de la proyección del mismo. El emisor láser y la cámara se instalan con un ángulo constante, creando un triángulo entre ellos y la proyección del láser sobre el objeto. De ahí, el nombre de triangulación. Debido a esta configuración, la proyección del láser cambia el campo de visión de la cámara en función de la distancia a la cámara.

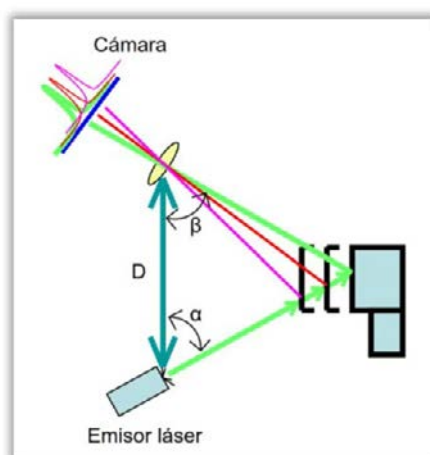


Ilustración 24. Esquema de un láser escáner.

Se observa que el lado  $D$  del triángulo es conocido, es decir, la distancia entre la cámara y el emisor láser. El ángulo del emisor láser  $\alpha$ , también es conocido. El ángulo de la cámara  $\beta$  puede ser determinado encontrando la localización del haz láser en el campo de visión de la cámara. Estos tres elementos determinan completamente la forma y el tamaño del triángulo y proporcionan la profundidad exacta del objeto medido.

Se puede demostrar que, cuanto mayor es el lado  $D$  (base), menor es el error en la estimación de la profundidad del objeto. Sin embargo, la base no puede ser muy grande porque entonces el emisor láser y la cámara tendrían un solape en el campo de visión muy reducido y la proyección del láser no siempre podría ser capturada por la cámara.

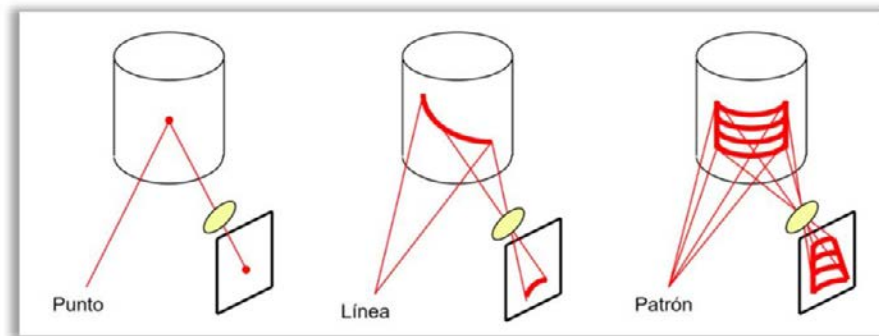
A modo de resumen, las posibles maneras para reducir la imprecisión en la dirección de la profundidad son:

- La reducción de la distancia del objeto al escáner reduce los efectos de las sombras.
- El incremento de la base de triangulación ( $D$ ) aumenta los efectos de las sombras.
- El incremento de la distancia focal de la lente disminuye el campo de visión.
- La reducción de la imprecisión de la medición se puede obtener aumentando los píxeles de la cámara.

En la mayoría de los casos se usa y arrastra una línea de láser, en lugar de un único punto, para obtener un objeto completo en 3D. Esto significa que el ángulo del emisor láser también cambia mientras se barre el objeto.

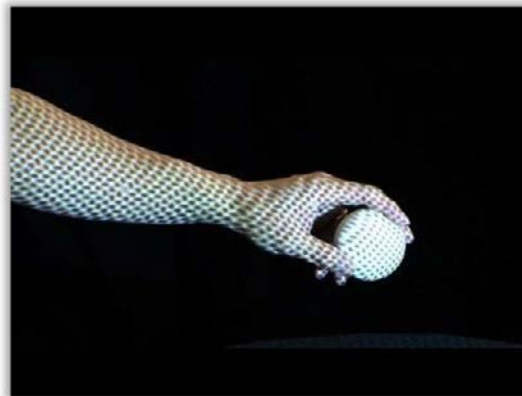
A causa de las limitaciones físicas de usar una base mayor y un campo de visión limitado en la cámara, los escáneres por triangulación se usan en aplicaciones que generalmente requieren una distancia de uso menor de 10 metros. Comparados con los escáneres de medio y largo alcance, los escáneres por triangulación alcanzan precisiones muy elevadas, del orden de micras.

Como se ha comentado anteriormente, el método de triangulación activa usa la luz del láser para solucionar el problema de identificación en la imagen, marcando el punto del objeto con el color de la luz del láser y de este modo, el haz puede ser detectado fácilmente en la imagen. Para evitar el uso de fixturas, se han impuesto algunas modificaciones innovadoras. En lugar de mover/rotar el emisor láser para cubrir todo el objeto, se pueden proyectar patrones de puntos o líneas que cubran todo el objeto a la vez.



*Ilustración 25. Tipos de marcas láser para reconocimiento de puntos homólogos.*

Hasta el momento se han utilizado diferentes patrones que van desde líneas regulares hasta patrones espacialmente codificados que modulan su frecuencia o su fase en el tiempo para proporcionar una mejor precisión. En el último caso se requiere que el escáner esté estático en relación con el objeto.



*Ilustración 26. Proyección de un patrón de luz para escaneo 3D.*

Incluso se utilizan patrones más complejos basados en el efecto Moiré para aumentar la precisión y robustez de estos sistemas. El efecto Moiré se produce como resultado de interactuar juntas dos señales con amplitud modulada. Este fenómeno se puede observar en la televisión cuando se entrevista a gente que viste alguna prenda de ropa a rayas. Un escáner Moiré proyecta un patrón regular sobre el objeto a escanear mientras que la cámara que toma la escena tiene integrado otro patrón regular. La interferencia de estos dos patrones genera un patrón Moiré a partir del cual se pueden determinar cambios precisos de profundidad.

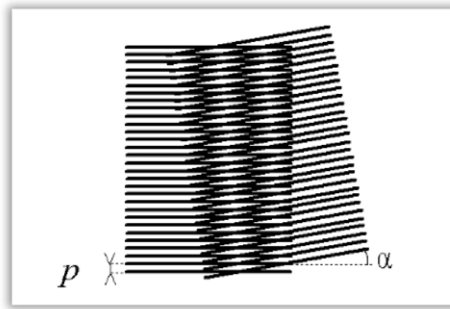


Ilustración 27. Patrón Moiré.

Como último apunte sobre los escáneres por triangulación, el principal reto al usar sistemas de proyección de patrones de líneas codificadas es la separación única de las diferentes direcciones de proyección en objetos que tienen saltos repentinos en profundidad y grandes diferencias de textura a lo largo de la superficie.

#### **2.2.2.2. Medición basada en tiempo**

Los escáneres de medición basados en tiempo son escáneres activos que miden un intervalo de tiempo entre dos sucesos. En general, hay dos principios de medición por tiempo: escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo) y basados en fase. También veremos brevemente los basados en interferometría.

##### **2.2.2.2.1. Escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo, detección incoherente)**

Las ondas de luz viajan con una velocidad finita y constante a través de un medio. Por consiguiente, cuando puede medirse el tiempo durante el cual la luz viaja de una fuente a un objeto reflectante y regresa a la fuente, la distancia a dicha superficie puede calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$D = \frac{(c \cdot t)}{2}$$

donde:

- $c$  = velocidad de la luz en el aire.
- $t$  = tiempo que tarda la señal en ir y volver.

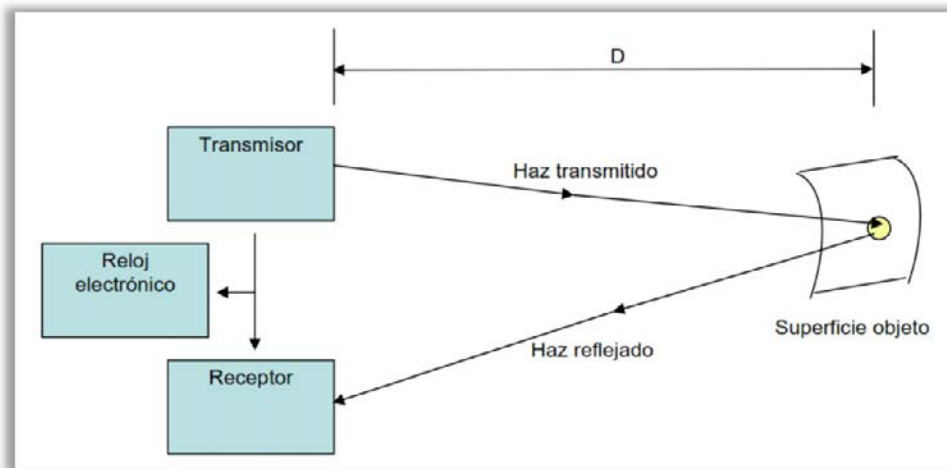


Ilustración 28. Esquema de un láser escáner de tiempo de vuelo.

El valor actual de la velocidad de la luz en el vacío es exactamente 299.792.458 m/s. Si la luz viaja por el aire, se debe aplicar un factor de corrección igual al índice de refracción (en función de la densidad del aire). Tomando el valor de la velocidad de la luz en el aire como 3,108 km/s aproximadamente se puede obtener que tarda 3.33 nanosegundos en recorrer un metro. Por tanto, para alcanzar una precisión de 1mm, necesitamos ser capaces de medir intervalos de tiempo de alrededor de 3.33 picosegundos.

Los escáneres por tiempo de vuelo no suelen usar haces continuos, sino pulsos de láser. Escanean todo su campo de visión punto a punto cambiando la dirección del haz mediante una unidad de desviación. Un láser escáner 3D típico basado en tiempo de vuelo puede medir de 2.000 a 50.000 puntos por segundo.

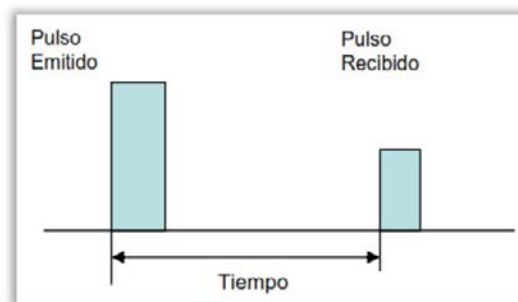


Ilustración 29. Diferencia de pulsos láser.

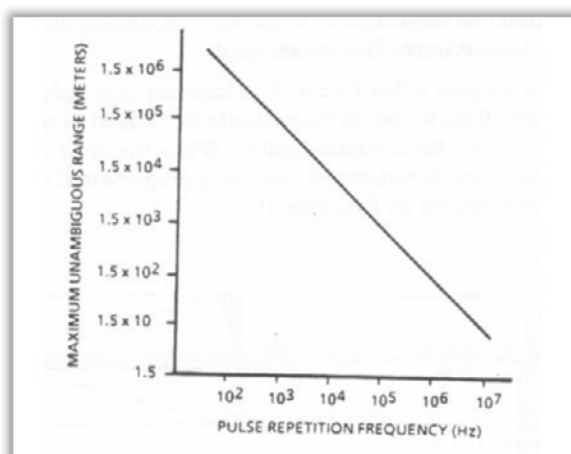
Hay que destacar que para que no se produzcan mediciones ambiguas, el tiempo medido ( $t$ ) debe ser mayor que la amplitud del pulso ( $T_{pulso}$ ). De esta manera:

$$t > T_{pulso}$$
$$d > \frac{1}{2} c \cdot T_{pulso}$$

Para entender mejor estas ecuaciones, podemos utilizar valores. Tomando  $T_{pulso}$  como 10ps, la máxima precisión que se puede alcanzar es de  $d = 1.5\text{mm}$ . La mayoría de los sistemas comerciales de medio y largo alcance proporcionan una precisión entre 6 y 10mm. Como la precisión depende del mecanismo del reloj, el error de un escáner por tiempo de vuelo es casi independiente de la distancia (excepto en el caso de los láseres de huella).

Es importante destacar que el método derivado del tiempo para medir el retorno del pulso depende de la resolución temporal deseada, de la resolución del reloj y del rango dinámico requerido del pulso. Normalmente, algunos principios para clasificar el diseño son el tiempo límite (amplitud constante), el tiempo de paso cero (la derivada), el tiempo del primer momento (la integral) y la constante de fracción de tiempo.

En un sistema de tiempo de vuelo, la máxima frecuencia de pulso está determinada por el hecho de que el emisor no puede enviar un pulso hasta que no haya recibido el anterior. La finalidad de esta restricción es evitar la confusión en la llegada de los pulsos, lo que recibe el nombre de máximo rango de certeza. Este parámetro depende de la duración del pulso y de su frecuencia.



*Ilustración 30. Relación de la frecuencia del punto y el rango de certeza.*

Hay tres factores principales que determinan la precisión de un sistema de medida por pulsos:

- La capacidad de seleccionar la misma posición relativa en el pulso emitido y recibido para medir el intervalo de tiempo. Esto está limitado por el ruido, la fluctuación, la fuerza de la señal, la sensibilidad del detector, y la brevedad y la capacidad de reproducción del emisor del pulso.
- La precisión con la que se fija un lapso de tiempo.
- La precisión del instrumental en la medida de los intervalos de tiempo.

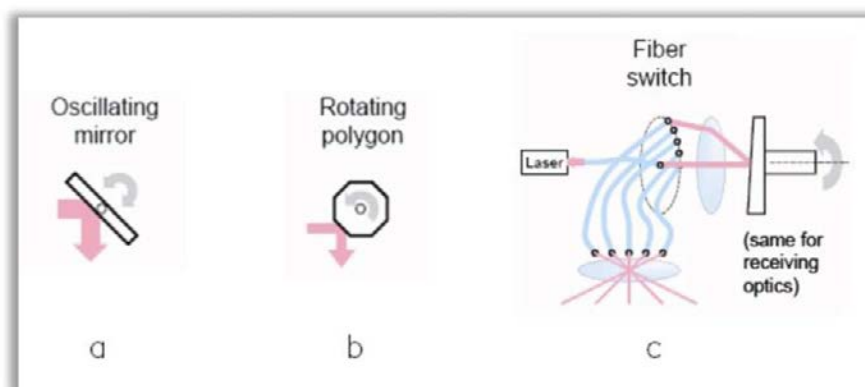
La ventaja de usar un sistema de pulsos para las mediciones láser de distancia es la alta concentración de la energía transmitida. Esta energía hace posible que se alcance el ratio señal-ruido (SNR) necesario para altas precisiones en mediciones de larga distancia (hasta varios centenares de metros). El inconveniente es el problema de detectar la llegada exacta de los retornos dispersos del pulso debido a la naturaleza cambiante de las tolerancias ópticas y la atenuación atmosférica.

**- Métodos de desviación del haz en los sistemas de medición basados en tiempo de vuelo**

El haz láser debe ser desviado para ser capaces de medir múltiples puntos desde el mismo punto de vista del escáner. En lugar de hacer rotar al escáner, se utiliza una unidad de desviación. La mayoría de estas unidades hacen uso de un espejo porque es mucho más ligero y se puede rotar con más rapidez y mayor precisión. Existen numerosos métodos para desviar el haz hacia una dirección específica sin tener que mover el escáner. De manera general, se emplean tres métodos para este propósito.

Una opción es usar un espejo oscilante que permite el movimiento del láser a lo largo de una línea (a). Una combinación de dos espejos permite la desviación del haz en dos direcciones. Para aumentar la velocidad de la unidad de desviación y reducir la complejidad de girar un espejo y luego volverlo atrás, se ha logrado un prisma óptico reflectante que rota (b). Este principio necesita sólo una dirección de rotación y, por tanto, es más rápido. Recientemente se ha introducido el uso de la fibra para hacer los sistemas más flexibles (c). Estos sistemas desvían el haz láser a un círculo de fibra óptica mediante un espejo rotatorio. Luego, las fibras ópticas transportan el haz de luz en cualquier dirección requerida. Las ventajas de este sistema son:

- La proporción de pulsos láser no está vinculada con el ángulo de vista.
- Es posible tener un patrón de escaneado muy denso y regular.
- No es necesaria una calibración tras el ajuste de fábrica.
- Es posible un traslado del láser hacia delante o lateral.



*Ilustración 31. Métodos de desviación del haz en los escáneres de tiempo de vuelo.*



### 2.2.2.2.2. Escáneres basados en la fase

Otro principio de medición basado en tiempo evita el uso de relojes de alta precisión modulando la potencia del haz láser. La luz emitida (incoherente) se modula en amplitud y se envía a una superficie. La reflexión dispersa se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviada y recibida, y por tanto el tiempo.

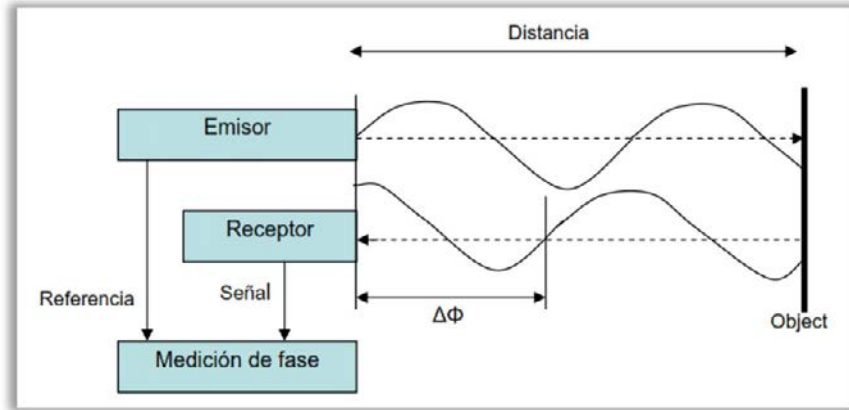


Ilustración 32. Esquema de un láser escáner de fase.

Los escáneres basados en la fase típicos modulan su señal utilizando modulaciones sinusoidales, amplitud modulada (AM), frecuencia modulada (FM), pseudoruido o modulación polarizada. En el caso de una señal sinusoidal modulada, la luz reflejada se demodula por medio de cuatro puntos de muestra que son disparados a la onda emitida. A partir de los cuatro puntos medidos  $c(\tau_0)$ ,  $c(\tau_1)$ ,  $c(\tau_2)$  y  $c(\tau_3)$  el desfase o diferencia de fase  $\Delta\phi$ , el desplazamiento  $B$  y la amplitud  $A$  se pueden calcular mediante:

$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4}$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2}$$

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{c(\tau_0) - c(\tau_2)}{c(\tau_1) - c(\tau_3)}\right)$$

La diferencia de fase puede estar relacionada con el retardo similar al medido en los escáneres basados en pulsos. La relación entre el desfase ( $\Delta\phi$ ), la frecuencia modulada ( $f_{modulada}$ ) y el retardo ( $t$ ) es:

$$t = \frac{\Delta\phi}{2\pi \cdot f_{modulada}}$$

Por tanto, según la ecuación de medición de distancia basada en el tiempo de vuelo, la distancia al objeto viene dada por:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{f_{modulada}}$$

De nuevo, tomando valores lo entenderemos mejor. Con una frecuencia de 10MHz y una resolución de fase de 0.01 grados (no demasiado difícil con estándares electrónicos), podemos obtener una resolución en z alrededor de 0.5mm.

Los escáneres con modulación continua del haz también tienen un máximo rango de certeza, similar al de los sistemas de tiempo de vuelo. Para estos sistemas el alcance está limitado al que corresponde a un retardo de fase de un ciclo de la onda senoidal. La ecuación del máximo rango de certeza en una onda continua es:

$$z_{amb} = \frac{c}{2 \cdot f_{modulada}}$$

En el ejemplo anterior, el intervalo está sobre los 15m (frecuencia de 10 MHz). La ambigüedad en la medición de distancia es proporcional a  $z_{amb}$  e inversamente proporcional al cociente señal ruido (SNR). Para evitar el inconveniente de un intervalo de ambigüedad en la medición, se pueden utilizar varias frecuencias de manera que con las frecuencias más bajas (mayor longitud de onda) se localiza el punto a medir y con las altas frecuencias se mide la distancia con precisión. En la última generación de escáneres basados en fase, se superponen 2 o incluso 3 longitudes de onda diferentes. La longitud de onda larga define la distancia con unicidad y la longitud de onda corta define la precisión que puede obtenerse. Generalmente, estos escáneres presentan una velocidad mayor y una resolución mejor que los escáneres de tiempo de vuelo, pero una precisión menor.

Generalmente, la precisión de un escáner basado en la fase está limitada por:

- Frecuencia de la señal o modulación.
- Precisión en el ciclo de medición de la fase. Depende de la fuerza de la señal, el ruido...
- Estabilidad del oscilador de modulación.
- Turbulencias en el aire por el que se realiza la medición.
- Variaciones en el índice de refracción del aire.

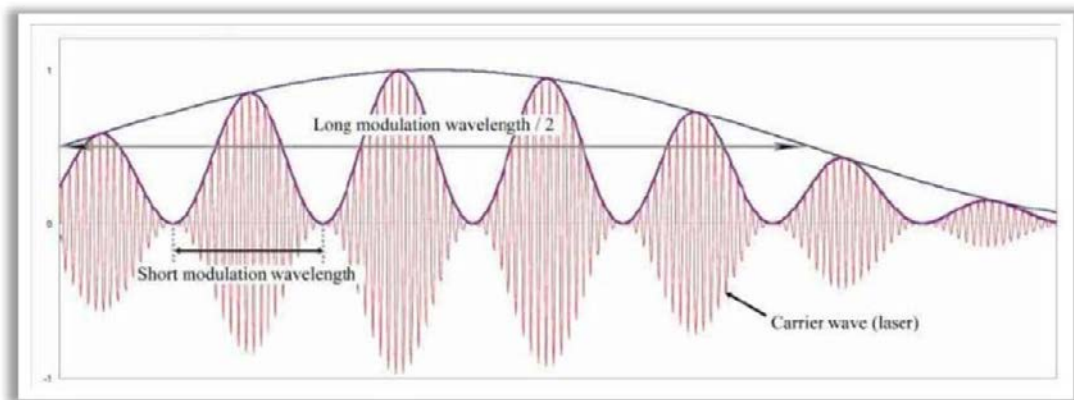


Ilustración 33. Modulación de un escáner láser de fase.

#### 2.2.2.2.3. Interferometría (coherente)

Interferometría significa que se usa la interferencia de diferentes ondas de luz para registrar posiciones tridimensionales en el espacio. La interferometría óptica se utiliza desde el siglo XIX. Las mediciones se restringieron a distancias de pocos centímetros debido a la intensidad limitada y la coherencia de las fuentes de luz convencionales. Estas restricciones se superaron cuando se inventaron los láseres. Los láseres han permitido desarrollar la interferometría y la han convertido en una técnica rápida, de alta precisión y versátil en la medición de largas distancias.

La medición interferométrica de distancias puede ser de muy alta precisión. Ofrece un grado de precisión mayor que los métodos telemétricos basados en el tiempo de vuelo o modulación del haz. Sin embargo, se adecúa perfectamente en entornos con atmósfera controlada (interiores, por ejemplo) con distancias no superiores a decenas de metros.

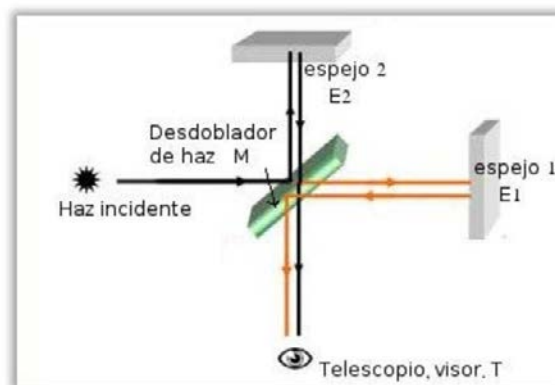


Ilustración 34. Esquema de un interferómetro.

En un láser escáner interferométrico, el haz láser se divide usando un prisma que refleja la mitad del haz en una dirección (brazo de referencia) y transmite la otra mitad (brazo de medición). Ambas partes del haz viajan por diferentes caminos y cuando se combinan se producen interferencias fringe. Desplazamientos muy pequeños (del orden de una fracción de longitud de onda) pueden detectarse (usando la detección coherente), y también se pueden medir grandes distancias con baja ambigüedad (contando las longitudes de onda). Se han construido muchos sistemas con este principio, por ejemplo multionda, holografía e interferometría speckle. Estos sistemas consiguen precisiones muy altas a costa de ser muy caros.

#### **- Holografía conoscópica**

Es una técnica interferométrica que consiste en hacer pasar un rayo reflejado en una superficie a través de un cristal birrefringente, es decir, un cristal que tiene dos índices de refracción, uno fijo y otro que dependerá del ángulo de incidencia. De esta manera se obtendrán dos rayos paralelos que interferirán con una lente cilíndrica. Esta interferencia será capturada por un sensor CCD y la frecuencia de esta interferencia determinará la posición del objeto. Las ventajas de esta técnica son, la alta precisión que alcanza (mejores que una micra) y el poder utilizar luz no coherente. La fuente de iluminación no tiene porqué ser un láser, la única condición es que sea monocromática.

#### **- Luz estructurada**

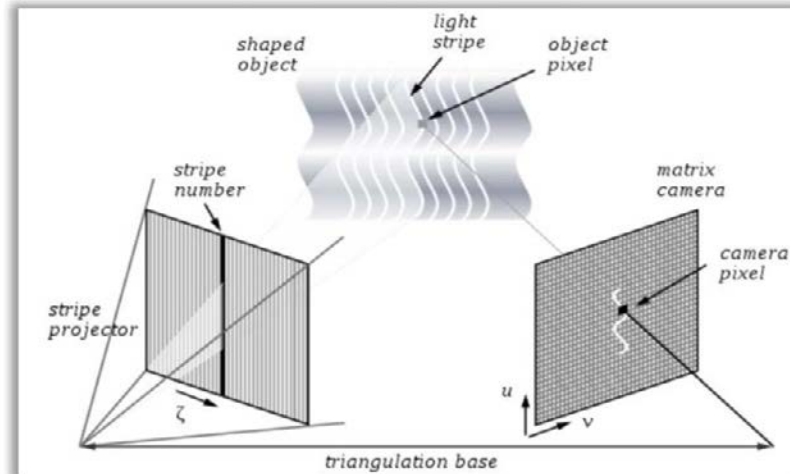
Este tipo de tecnología utiliza la proyección de un patrón de luz determinado en el objeto y analizan la deformación del patrón para obtener el modelo. El reflejo se captura con una cámara fotográfica y posteriormente mediante unos algoritmos se determina la posición de cada punto en el espacio 3D.

El patrón de luz suele consistir en un conjunto de líneas paralelas generadas bien por interferencia laser o por proyección. Si se realiza mediante la proyección del patrón de luz los escáneres estarían en la categoría descrita en el apartado de escáneres activos de triangulación (triangulación óptica.) En algunos casos de estos equipos de interferencia láser o de proyección óptica, dos cámaras fotográficas situadas a los lados del emisor de luz permiten obtener mejores resultados.

Mediante el análisis de la deformación de las líneas se obtienen los puntos 3D. La anchura de una línea es función de la inclinación de la superficie del objeto en que se refleja. La frecuencia y la fase de la línea también aportan información, que se pueden analizar mediante la transformada de Fourier.

Como con el resto de tecnologías ópticas, este tipo de escáneres tiene problemas con las superficies transparentes y reflexivas puesto que la luz no infiere en ellas el mismo reflejo que en las opacas. Una manera de solucionar este problema es aplicando una capa fina de laca opaca a las superficies problemáticas.

La ventaja de los escáneres 3D de luz estructurada es la velocidad. En vez de escanear un punto a la vez, escanean múltiples puntos o el campo de visión entero inmediatamente. Esto reduce o elimina el problema de la deformación por movimiento.



*Ilustración 35. Esquema de escaneado con escáner de luz estructurada.*

## 2.3. CLASIFICACIÓN POR SISTEMA DE BARRIDO

En esta clasificación podemos distinguir escáneres de cámara, híbridos o panorámicos.

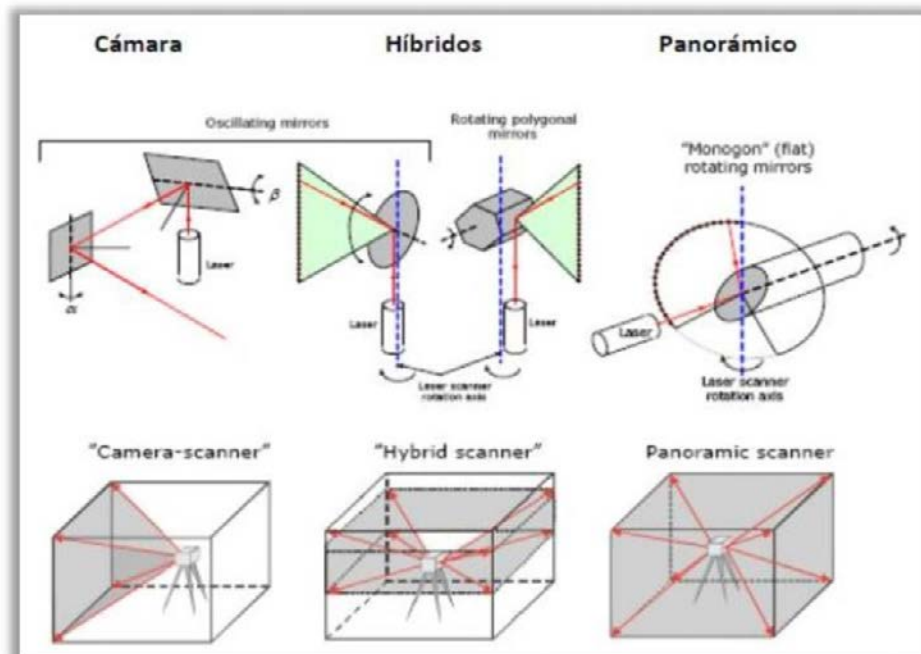


Ilustración 36. Sistemas de barrido en los equipos láser escáner.

### 2.3.1. Cámara

Este sistema de barrido está limitado a un ancho de escena específico, delimitado por el tamaño de la ventana de barrido, que puede ser de un máximo de 60° tanto en ángulo horizontal como en vertical. Desde el punto de vista óptico consiste en un espejo interno que incrementa su ángulo horizontalmente, para que otro espejo interno realice el barrido desde arriba hacia abajo o viceversa. Se denomina tipo cámara, porque su visibilidad, campo de acción y operatividad, son muy parecidos a los de una cámara de fotogrametría terrestre.

### 2.3.2. Panorámica

El sistema de barrido permite girar el haz de luz láser alrededor de dos ejes (horizontal y vertical) de manera similar a un teodolito. Para cada posición se realiza un barrido vertical completo con un espejo rotativo de alta velocidad, permitiendo realizar un barrido total de 360° por 310°. La única zona que queda por barrer es la delimitación por la base del propio instrumento.

### 2.3.3. Híbrido

Este sistema es una combinación de los dos anteriores. El láser gira pequeños intervalos horizontales, y en cada intervalo el espejo oscilante se mueve desde arriba hacia abajo en forma similar a los del tipo cámara, con algunas limitaciones en el barrido vertical, pudiendo girar 360° y tomar todo lo que tiene alrededor.

## **2.4. CLASIFICACIÓN POR POSICIÓN**

### **2.4.1. Equipos estáticos**

Estos equipos se mantienen en una posición fija durante la toma de datos, generalmente montados sobre trípodes o plataformas estables. El dispositivo, por lo general, se mueve a pequeños incrementos angulares de izquierda a derecha, y entre cada incremento se queda en una posición estática, en la que el espejo giratorio se mueve de abajo hacia arriba y va disparando el láser a intervalos predeterminados. Las ventajas de este tipo de equipos son la precisión y la alta densidad de puntos. El láser escáner estático suele ser el método más extendido para realizar escaneados terrestres.

### **2.4.2. Equipos dinámicos**

Dentro de los escáneres terrestres, existe una versión dinámica de los mismos, que es básicamente, un sistema compuesto por uno o dos escáneres montados sobre el techo de un vehículo. Estos escáneres exploran a derecha e izquierda del vehículo realizando un barrido de 300m de ancho, con detalles milimétricos de todos los puntos del terreno que va recorriendo. Estos vehículos llevan montados sistemas GNSS (GPS+GLONAS+GALILEO), conjuntamente con una plataforma inercial o IMU, que mantiene la precisión en las coordenadas en los momentos de sombra, es decir, cuando los satélites son insuficientes para mantener el tiempo real RTK en forma dinámica.

Un ejemplo de este tipo de equipos son los carros de medición en vías y túneles, consiguiendo rendimientos muy superiores a los realizados con equipo estático.



*Ilustración 37. Carro de medición de vías.*

## 2.5. ASPECTOS METROLÓGICOS: ANÁLISIS DEL ERROR

Las compañías que producen escáneres láser publican las precisiones de sus equipos de manera que ilustran las ventajas de su producto en particular. Sin embargo, la experiencia demuestra que algunas veces esto no se debería tomar como valor real y que la precisión de los instrumentos, que se fabrican en series limitadas, varía de un instrumento a otro y depende de la calibración individual y del cuidado que se tenga en su uso.

Cada nube de puntos producida por un escáner láser contiene un considerable número de puntos que presentan errores groseros. Si el producto entregado es una nube de puntos, la precisión no se puede garantizar de la misma manera que con instrumentos topográficos convencionales. Se han publicado muchos artículos sobre tests de precisión con escáneres láser. *i3mainz*, la *University of Applied Sciences* de Mainz y el *Institute of Geodesy and Photogrammetry* del *Swiss Federal Institute of Technology Zurich*, han realizado numerosos trabajos sobre la precisión de los escáneres láser. En ellos, para poder describirlas de manera sistemática, las fuentes de error en el escaneado láser se dividen en cuatro categorías: errores instrumentales, errores relacionados con el objeto, errores por el entorno y errores metodológicos.

### 2.5.1. Errores instrumentales

Los errores instrumentales pueden ser sistemáticos o aleatorios y se deben al diseño del escáner. Los errores aleatorios afectan principalmente a la precisión de la medida y la localización del ángulo en los sistemas de medición de tiempo de vuelo basados en pulsos. Los errores sistemáticos pueden ser generados por la no linealidad de la unidad de medición del tiempo o por la deriva de temperatura en la electrónica de medición del tiempo provocando deriva en la distancia entre otros problemas.

#### - Propagación del haz láser

La divergencia del haz es la anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida. La divergencia del haz tiene una fuerte influencia con la resolución de la nube, así como en la ambigüedad posicional del punto medido. La divergencia del haz se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

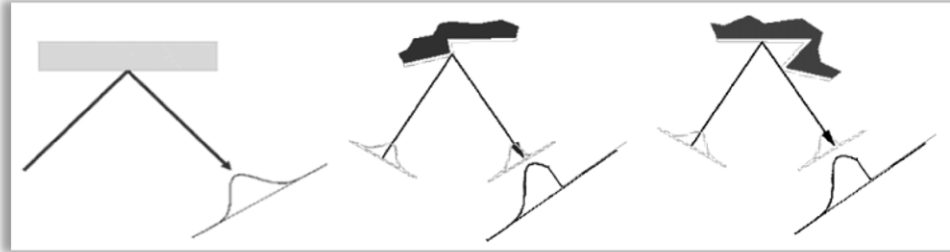
$$w(\rho_w) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot \rho_w}{\pi \cdot w_0^2}\right)^2}$$

donde:

- $\rho_w$  = la distancia respecto de la circunferencia del haz.
- $w$  = radio del haz.
- $w_0$  = radio mínimo del haz (en el punto inicial) = circunferencia del haz.



Se entiende que la reflexión del haz tiene una forma gaussiana. Para largas distancias, la divergencia es aproximadamente lineal y el diámetro del haz se expresa como la posición que engloba el 86% de toda la energía del haz con una distribución de irradiancia gaussiana.

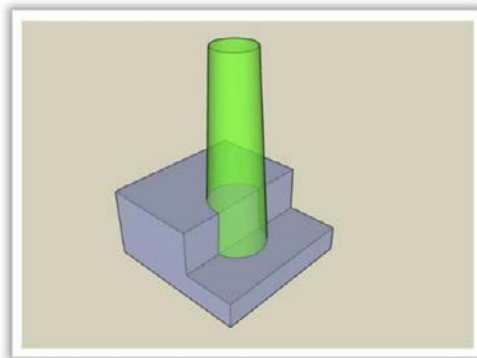


*Ilustración 38. Reflexión gaussiana.*

En la práctica, la divergencia del haz tiene efecto en la localización del punto medido. La aparente localización del punto observado está en la línea central del haz emitido. Sin embargo, la localización real está en algún lugar de la huella del haz proyectada. Según Lichti y Gordon, la ambigüedad del haz es aproximadamente igual a un cuarto del diámetro del haz láser.

#### **- Problema del borde partido**

Una de las consecuencias más importantes de la divergencia del haz es el problema del borde partido. Cuando un haz láser choca contra un borde de un objeto, el haz se divide en dos. Una parte se refleja en la primera parte del salto del borde mientras que la otra parte va más lejos hasta que alcanza otra superficie. El resultado de ello es que la información de un pulso láser que llega al receptor llega desde dos puntos diferentes en el espacio. Las coordenadas de este punto, en relación con la posición del escáner, se calculan tomando la media de todas las señales recibidas para un mismo pulso y, por tanto, el punto se ubicará en un lugar incorrecto.



*Ilustración 39. Problema del haz láser sobre bordes.*

Cuando se utiliza un escáner de alta resolución en un objeto, la probabilidad de que el haz dé en un borde aumenta y los datos resultantes mostrarán ruido justo detrás de los bordes del objeto. Los escáneres con una anchura de haz menor ayudan a solucionar este problema, pero el alcance se mantiene mientras la anchura del haz aumenta con la distancia.

### - Ambigüedad en la distancia

La ambigüedad en la distancia se puede expresar en función de un número de parámetros según el tipo de escáner láser y su principio de funcionamiento. A continuación, se resumen las ambigüedades en la distancia tomadas de Beraldin et al.

Para un escáner por triangulación, la ambigüedad en la distancia se puede expresar como:

$$\delta_z \approx \frac{Z^2}{f \cdot D} \delta_p$$

donde:

- $f$  es la posición efectiva de la huella láser (longitud focal efectiva).
- $D$  es la base de la triangulación.
- $\delta_p$  es la ambigüedad en la posición láser. Depende del tipo de huella del sensor láser, del algoritmo para detectar picos, la razón señal ruido y la forma de la huella del láser en la imagen.
- $Z$  es la distancia a la superficie.

Para un escáner basado en tiempo de vuelo, la precisión en la distancia depende del mecanismo del reloj. Esto nos lleva a la siguiente ecuación:

$$\delta_z \approx \frac{c \cdot T_t}{2 \cdot \sqrt{SNR}}$$

donde:

- $T_t$  es el tiempo de lanzamiento del pulso.
- $SNR$  es la razón señal ruido.

La mayoría de los escáneres terrestres de medio y largo alcance proporcionan una ambigüedad en la distancia de entre 5mm y 50mm para una distancia de 50m. En la fase de modelado, estos errores son minimizados al hacer la media o al ajustar formas primitivas a la nube de puntos.

Los escáneres de onda continua evitan la necesidad de contar con mecanismos de relojes de alta velocidad modulando la señal láser. La ambigüedad en la distancia en los escáneres láser de amplitud modulada depende únicamente de la longitud de onda modulada y de la razón señal ruido. Se puede describir como:

$$\delta_z \approx \frac{\lambda_m}{4\pi \cdot \sqrt{SNR}}$$

Una comparación de la ambigüedad en la distancia para los diferentes tipos de escáner láser se puede ilustrar en un gráfico como el siguiente:

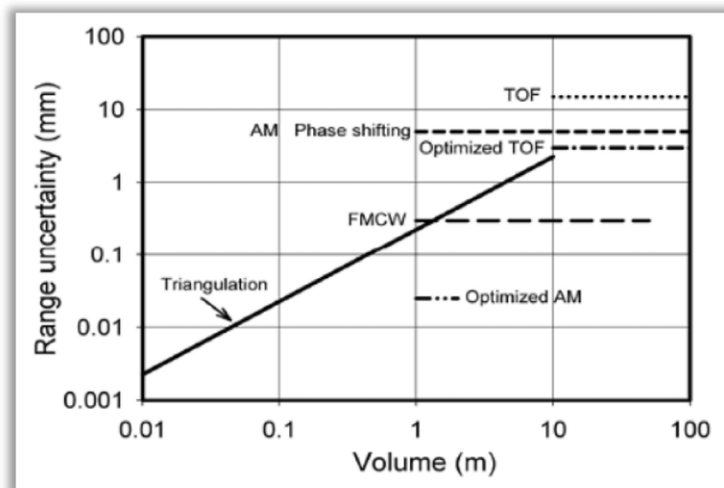


Ilustración 40. Relación de ambigüedad en la distancia en diferentes tipos de láser escáner.

#### - Ambigüedad angular

La mayoría de los escáneres láser utilizan espejos rotatorios para guiar la señal láser hacia una dirección determinada. Una diferencia angular pequeña puede provocar un error considerable en las coordenadas cuando la distancia al escáner aumenta. La precisión angular depende de cualquier error en la posición de los espejos y la precisión en la medición de los ángulos. Como la posición de puntos aislados es difícil de verificar, se conocen pocas investigaciones acerca de este problema. Como se describe en Boehler et al., los errores se pueden detectar midiendo distancias horizontales y verticales cortas entre objetos (por ejemplo, esferas) situados a la misma distancia del escáner y comparando estas mediciones con otras realizadas con métodos topográficos más precisos.

#### - Errores en los ejes de un TLS (escáner láser terrestre)

En el desarrollo de los procesos de calibración de un escáner láser, se necesita un modelo geométrico del escáner. Por lo tanto, definimos los siguientes ejes:

- Eje vertical: Es el eje que permite al escáner mover el haz láser de forma horizontal. Dependiendo del tipo de escáner, panorámico o escáner de cámara, éste es el eje de rotación de la cabeza del escáner o el eje ortogonal a los ejes de oscilación de los espejos.
- Eje de colimación: Es el eje que pasa por el centro del espejo de escaneado y el centro de la huella del láser sobre la superficie del objeto escaneado.
- Eje horizontal: Es el eje de rotación del espejo de escaneado.

Debido a las tolerancias en la fabricación, estos ejes no están alineados perfectamente, lo que nos lleva a un error en la colimación y a un error en el eje horizontal.

## 2.5.2. Errores relacionados con los objetos

Como los escáneres miden la reflexión del haz láser sobre la superficie, debemos tratar con las leyes físicas de la reflexión y las propiedades ópticas de los materiales. La reflexión de luz monocromática normalmente muestra rayos reflejados en muchas direcciones. Este tipo de reflexión isotrópica (difusa) se puede describir mediante la ley del coseno de Lambert:

$$I_{reflejada}(\lambda) = I_i(\lambda) \cdot k_d(\lambda) \cdot \cos(\theta)$$

con:

- $I_i(\lambda)$  la intensidad de la luz incidente como función de una longitud de onda (color, es absorbida cuando viaja por el aire).
- $k_d(\lambda)$  el coeficiente de reflexión difusa que también es función de la longitud de onda.
- $\theta$  el ángulo entre la luz incidente y el vector normal a la superficie.

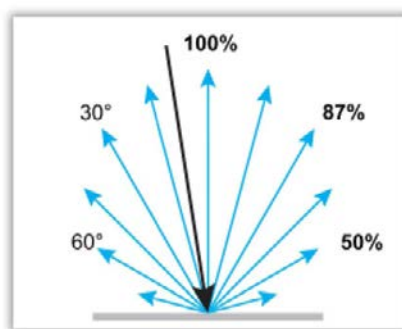


Ilustración 41. Reflexión sobre una superficie lambertiana.

Esta fórmula nos muestra que el haz láser está afectado por la absorción de la señal que viaja por el aire, la reflexión del material sobre el que se mide y el ángulo de incidencia entre el haz láser y la superficie medida. Esto significa que para superficies muy oscuras (negras) que absorben la mayor parte del espectro, la señal reflejada será muy débil, por lo que la precisión del punto estará afectada por el ruido. Superficies con alta reflectividad (superficies brillantes, por ejemplo) dan unas mediciones más fiables y precisas. Sin embargo, si la reflectividad del objeto es demasiado alta (superficies metálicas, cintas reflectantes...) el haz láser es desviado totalmente y dará en otras superficies o se propagará por el aire libre. Esta desviación provoca que el punto medido no sea el punto al que apunta el láser, sino otro o ninguno. Este tipo de ruido se le denomina ruido *speckle*.

El registro de superficies con reflectividad diferente también ocasiona errores sistemáticos en la distancia, algunas veces incluso de varias veces la desviación estándar de una simple medición.

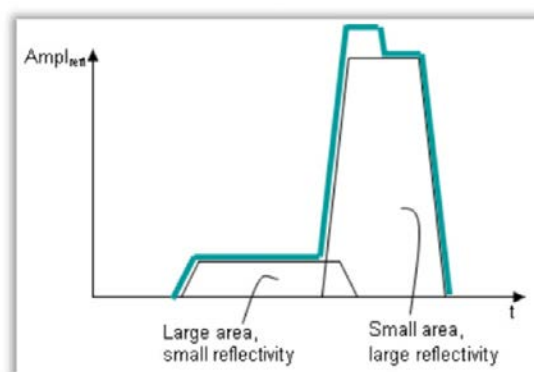


Ilustración 42. Relación de errores sobre superficies de diferente reflectividad.

Al igual que las propiedades de reflexión de la superficie, las propiedades del color también afectan a la precisión. En Clark et al. han visto que existen discrepancias sistemáticas significativas en la distancia que, en términos generales, se pueden relacionar con el color de cada superficie en relación a la longitud de onda del láser utilizado.

Aparte de los efectos de reflectividad, numerosos materiales presentan una capa semitransparente que permite pasar el haz láser refractándose y reflejándose en el propio material, como por ejemplo, la madera, el mármol y el poliestireno expandible. Estos efectos nos conducen a añadir una constante en las mediciones de la distancia que debe ser considerada en su cálculo.

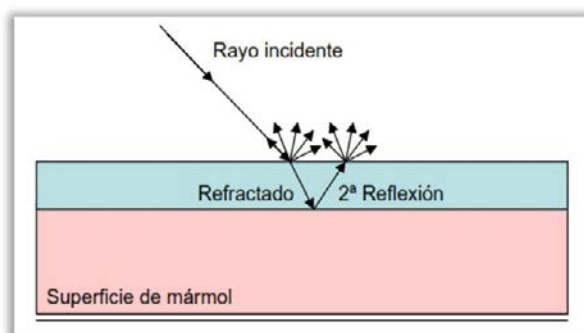


Ilustración 43. Reflexión sobre una superficie de mármol.

### 2.5.3. Condiciones ambientales

#### - Temperatura

Se destaca que la temperatura dentro del escáner puede ser bastante más alta que la temperatura de la atmósfera de alrededor del equipo debido al calor interno o al calor resultante de la radiación externa (por ejemplo, el sol). Esta fuente de radiación externa podría calentar un lado del trípode o del escáner, provocando que ese lado se dilate, distorsionando lentamente los datos tomados con el escáner.

No sólo la temperatura del equipo es importante, sino también la temperatura de la superficie escaneada. Cuando se escanea algo a alta temperatura, por ejemplo en un entorno industrial, la radiación causada por las superficies calientes de fondo reduce la razón señal ruido y, por tanto, la precisión de las mediciones.

#### **- Atmósfera**

Los escáneres láser solo funcionan adecuadamente cuando se utilizan dentro de un cierto rango de temperatura. Incluso dentro de este rango se pueden observar desviaciones en las distancias.

Como en todas las operaciones de medición de distancias, los errores naturales provienen principalmente de las variaciones atmosféricas de temperatura, presión y humedad, lo que afecta al índice de refracción y modifica la longitud de onda electromagnética. Esto significa que la velocidad de la luz del láser depende en gran medida de la densidad del aire.

La mayoría del software de escaneado láser proporciona una corrección del índice de refracción al establecer un parámetro de refracción. Generalmente, los escáneres están preparados para usar los parámetros atmosféricos del estándar ISO (15°C; 1013,25hPa). Cuando se trabaja bajo diferentes condiciones atmosféricas, estos parámetros se deben adaptar. Una diferencia de temperatura de 10°C o de una presión de 35hPa produce un error en la distancia de 1mm/100m.

Cuando se trabaja en aplicaciones terrestres, este efecto no debería afectar seriamente a los resultados para cortas y medias distancias. Para distancias largas o mediciones de alta precisión es obligatorio aplicar los parámetros de corrección atmosférica.

Cuando se trabaja, por ejemplo, en una región montañosa, el descenso de temperatura se puede estimar en 0.65°C/100m y el descenso de presión en 10hPa/100m. Para un escáner estacionado a una altitud de 2000m, el error en la distancia vendría a ser de unos 8mm/100m.

#### **- Interferencia de radiación**

Como los escáneres láser trabajan en una banda de frecuencia muy estrecha, la precisión en la distancia puede estar influenciada por una radiación externa, como por ejemplo las fuentes fuertes de iluminación externa. Se pueden aplicar filtros especiales de interferencia óptica para permitir que sólo las frecuencias correctas alcancen el receptor.

#### **- Distorsión por movimiento**

La mayoría de los escáneres láser escanean a una velocidad de 2.000-500.000 puntos por segundo. Aunque son muy rápidos, escanear a alta resolución puede llevar entre 20 y 30 minutos en el caso de los escáneres basados en el tiempo de vuelo y sobre 10 minutos en los escáneres basados en la fase. Durante este tiempo el escáner es susceptible de vibraciones a su alrededor que produzcan movimientos. Esto es lo que llamamos distorsión por movimiento.

Como cada punto se toma en un tiempo diferente, cualquier movimiento distorsionará los datos tomados. Por tanto, el escáner necesita estar montado en una plataforma estable para minimizar las vibraciones. El objeto escaneado debe permanecer estático también.

Hay que tener en cuenta que el escáner también se mueve por cambios en la temperatura. Por ejemplo, si el sol da por un lado del escáner, las patas del trípode de ese lado se podrán expandir y distorsionar lentamente los datos escaneados. Los últimos escáneres láser, también llamados estaciones láser, incorporan un compensador de eje dual integrado que compensa cualquier movimiento del escáner durante el proceso de escaneado.

#### **2.5.4. Errores metodológicos**

Los errores metodológicos se deben al método topográfico elegido o a la experiencia de los usuarios con esta tecnología. Por ejemplo, si el usuario establece una densidad de malla (resolución) más alta que la precisión por punto del escáner, el escaneado estará sobremuestreado. Entonces, se genera mucho ruido extra y los tiempos de procesamiento se incrementarán de manera considerable. Otra causa de error puede ser una incorrecta elección del escáner. Tomando un escáner con un alcance máximo próximo a la distancia máxima a la que se encuentra el objeto escaneado, los escaneados contendrán mediciones menos precisas y un posible ruido.

Los posibles errores generados durante la fase de registro o consolidación también se encuentran en esta categoría. Dependiendo de la técnica empleada para registrar las diferentes nubes de puntos, se introducen errores. Estos errores ocurren tanto con el método indirecto de registro/georreferenciación como con el método directo de registro/georreferenciación.

## **2.6. EQUIPAMIENTO, ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y MATERIAL AUXILIAR DE UN ESCÁNER LÁSER**

### **2.6.1. Equipamiento**

Son muchas las funcionalidades y los equipamientos de los equipos láser escáner que actualmente se integran sobre el mismo equipo. El desarrollo de la tecnología aporta muchas mejoras entre las que destacan:

- Tamaño: cada vez se logra crear equipos más pequeños sin restar funcionalidades. Es una mejora imprescindible, ya que equipos más antiguos llegaban a medir hasta 70cm en alguna de sus tres dimensiones. Los actuales no miden más de 25cm.
- Peso: al igual que con el tamaño, cada vez se construyen equipos más ligeros sin afectar a la calidad, pasando de hasta 15kg que pesaban hace unos años, hasta 5kg que llegan a pesar actualmente.
- Cámara digital integrada: en los nuevos modelos, la cámara digital viene incorporada en el equipo, reduciendo así el volumen total del equipo y el número de bultos a manipular. Por otro lado, la definición también aumenta, llegando hasta 70 megapíxeles en las cámaras actuales, lo que proporciona más precisión al equipo.
- Baterías de alto rendimiento: cada vez son más pequeñas y aguantan más tiempo, lo que permite más autonomía para trabajar con los equipos.
- Almacenamiento de datos: las tarjetas cada vez más pequeñas pero de mayor capacidad, permiten una gestión de los datos casi sin límites.
- Pantalla táctil: hace más fácil e intuitivo el manejo del equipo, y evita el uso de grandes teclados.
- GPS integrado: para dotar de posicionamiento absoluto al punto de estación del escaneado.
- Brújula digital: hace que el proceso de registro automático sea más sencillo y brinda orientación al escaneo.
- Sensor de altura: da información sobre la altura a la que se encuentra el equipo a través de un barómetro electrónico. Muy útil para mediciones a distinto nivel.
- Compensador de dos ejes: proporciona precisión a la nivelación del equipo.
- WLAN (Wifi): Permite la gestión en remoto del equipo y sus datos.
- Telescopio integrado: para alineamientos en Topografía.



### **2.6.2. Especificaciones técnicas**

Éste es uno de los puntos más importantes a la hora de planificar un trabajo con equipos láser escáner. Las especificaciones técnicas nos van a permitir saber a priori cuál va a ser la calidad de nuestros datos si trabajamos con el equipo correspondiente. Sabiendo esto, debemos elegir el equipo que mejor se adapte a nuestro proyecto.

En el documento de especificaciones técnicas encontraremos todas aquellas que afecten al rendimiento y al hardware del equipo. A continuación se muestran unos valores aproximados de las características más importantes que nos proporcionan el conjunto de equipos disponibles actualmente:

- Rango de medida: de 0,6 a 2000m. Se clasifican en equipos de corto, medio y largo alcance.
- Velocidad de medición: de 8.800 a 976.000 puntos por segundo, dependiendo del equipo y de las condiciones del proyecto.
- Error en distancia: de 0,6 a 8mm. Éste valor depende sobre todo del rango de medida.
- Resolución: de hasta 70 megapíxeles en la mayoría de los equipos actuales.
- Campo visual: de 80 a 305° en vertical y 360° en horizontal, según el equipo utilizado.
- Divergencia del haz: de 0,16 a 0,25mrad.
- Capacidad de almacenamiento: de hasta 32Gb en la mayoría de los equipos actuales.
- Duración de la batería: de 2,5 a 5 horas de autonomía según el equipo utilizado.
- Temperatura ambiente: de 0 a 50°C en condiciones normales. Generalmente aguantan temperaturas más extremas, pero deben ser ocasiones excepcionales y con tiempos de medición muy reducidos.

### **2.6.3. Accesorios**

Como complemento a los equipos, tenemos una amplia gama de accesorios que permiten ciertas funcionalidades concretas. Algunos de ellos son básicos y otros lo son menos, pero todos ellos cumplen un objetivo. Los accesorios más comunes son:

- Estuche de transporte: protege al equipo y a otros accesorios en un único bulto para facilitar su transporte y almacenamiento.
- Trípode: el equipo se coloca anclado sobre él, y permite posicionarlo en altura sobre el punto de estación. La modificación de la longitud de las patas proporciona una primera nivelación aproximada.

- Base nivelante: se coloca anclado bajo el equipo y permite dar más precisión a la nivelación tras aproximarse con las patas del trípode.
- Baterías: proporcionan la energía con la que trabaja el equipo.
- Cargador para batería.
- Cable para datos: se conecta al equipo por un extremo y a un ordenador por el otro. Permite la gestión de los datos.
- Cinta de medición: para medir la altura a la que se encuentra el centro del sistema sobre el punto de estación.
- Señales de puntería: sirven como puntos de control de la geometría y mejoran la recepción de la señal con superficies reflectantes.
- Soporte: la empresa que vende el equipo proporciona soporte informático, asistencia técnica y garantía.
- Adaptador para montaje inverso.

### **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. VISIÓN GENERAL**

Utilizar un escáner láser en la captura de un edificio no es sólo apretar un botón y esperar a que se obtengan los resultados. Se requiere un profundo conocimiento del equipo y del proceso de escaneado. Algunos pasos del proceso de escaneado son bastante automáticos mientras que otros todavía requieren una labor intensa. En este capítulo se discutirá el proceso del escaneado láser terrestre.



*Ilustración 44. Método general de trabajo con equipos láser escáner.*

### 3.2. PLANIFICACIÓN

De momento no hay ningún proceso estándar para la planificación de un escaneado láser terrestre. Sin embargo, la planificación debe contener, como mínimo, los siguientes puntos de acuerdo con la comunidad de usuarios de escáneres láser:

- Determinar los objetivos.
- Análisis del área a levantar.
- Determinar las técnicas de medición y el equipamiento.
- Gestión de los datos.

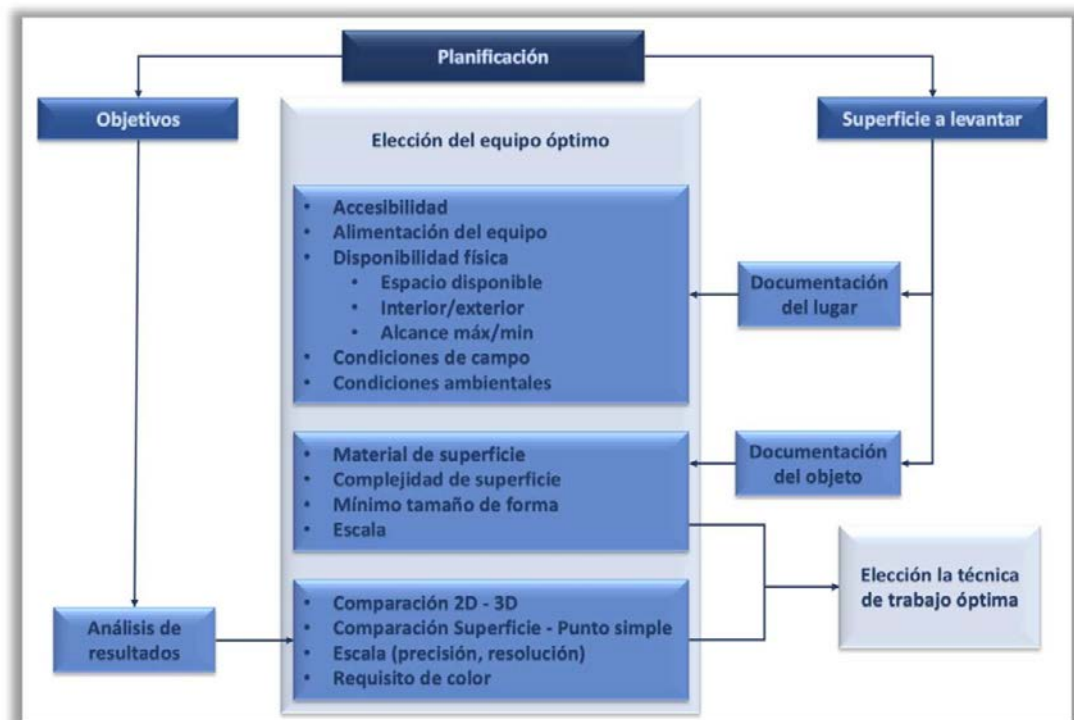


Ilustración 45. Planificación de trabajos con equipos láser escáner.

#### 3.2.1. Determinar los objetivos del trabajo

Uno de los puntos clave cuando se escanea un objeto es conocer las necesidades del cliente. Para entender completamente las necesidades del cliente debemos responder algunas preguntas:

- ¿Por qué el cliente quiere que se documente ese objeto y qué quiere hacer con los datos de la documentación?

- La justificación de la necesidad de documentar un objeto o un edificio puede proporcionar una idea acerca de los requerimientos en los resultados y en la precisión. A menudo, el cliente puede pensar que el escaneado láser es la herramienta perfecta para su problema porque ha escuchado que otra empresa lo ha usado. O, incluso, al contrario, el cliente puede no estar seguro de contar con un escaneado láser para la captura porque es escéptico y confía más en las técnicas tradicionales. Sabiendo las necesidades de los clientes, se puede ofrecer una guía sobre las técnicas de medición más apropiadas.
- ¿Qué resultados necesita?

En relación con la motivación del trabajo, necesitamos definir los documentos a entregar. Estos documentos pueden ser desde planos 2D y elevaciones, hasta modelos 3D o incluso animaciones 3D. En algunos casos puede que el cliente sólo quiera la nube de puntos *cruda* (datos directos de la observación) con la finalidad de archivarla. Particularmente importante es el nivel de detalle (tamaño de los elementos más pequeños) de los documentos a entregar porque ello ayuda a determinar la resolución (densidad de puntos).

### **3.2.2. Análisis del área a levantar**

Analizar qué tipo de información se necesita del objeto a modelar nos da una idea de la complejidad y del tiempo necesario para llevar a cabo la tarea. Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, la resolución requerida y la precisión de la documentación vienen condicionadas por la escala del levantamiento o por la entidad mínima reconocible en los productos finales que se entregan. Notas de campo, informes, mapas, fotografías o videos del lugar pueden ayudar a determinar los posibles riesgos del momento de captura, de igual modo que levantamientos anteriores que pudieran haber sido realizados con otras técnicas (mediciones a mano, con GPS o con estación total).

No sólo es necesario analizar la información útil del objeto en cuestión sino también de sus alrededores. El lugar puede estar emplazado en un sitio disperso con obstrucciones, limitando los estacionamientos posibles, o puede incluso haber restricciones temporales para acceder al lugar (por ejemplo, en las obras de los túneles del metro). Indirectamente, los emplazamientos posibles del escáner láser determinan el alcance máximo y mínimo que el escáner debe cumplir.

Usando todos estos datos, se puede tomar una decisión acertada acerca de la técnica más adecuada. En caso de seleccionarse el escáner láser, se puede determinar el tipo. El escaneado láser es una técnica altamente desarrollada, pero no siempre es la solución más efectiva. Algunas veces es mucho más fácil y eficiente usar alguna otra técnica. Algunas razones para elegir el escáner láser son:

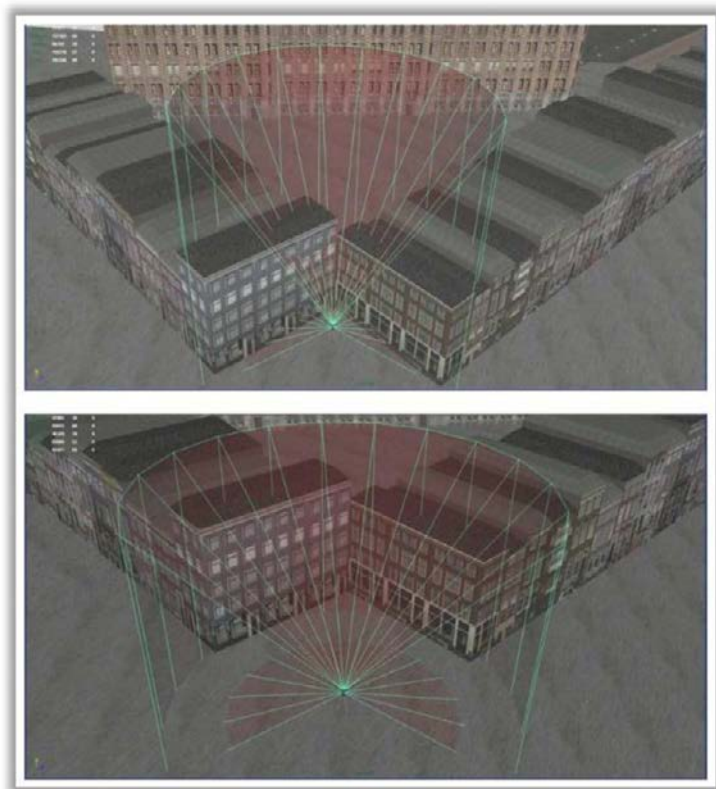
- Estructuras de superficies muy complejas (formas orgánicas).
- Necesidad de entregar documentos 3D.
- Necesidad de medición de superficies en lugar de mediciones puntuales.
- Datos que puedan ser usados por un equipo multidisciplinar para diferentes propósitos.

- Documentar sin saber a priori el futuro uso de los datos.
- Restricciones de acceso.

### **3.2.3. Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser**

Una vez recopilada la información del sitio a documentar y elegido el escaneado láser como la mejor técnica posible para ello, hay que planificar tanto el emplazamiento del equipo láser escáner como los puntos de referencia.

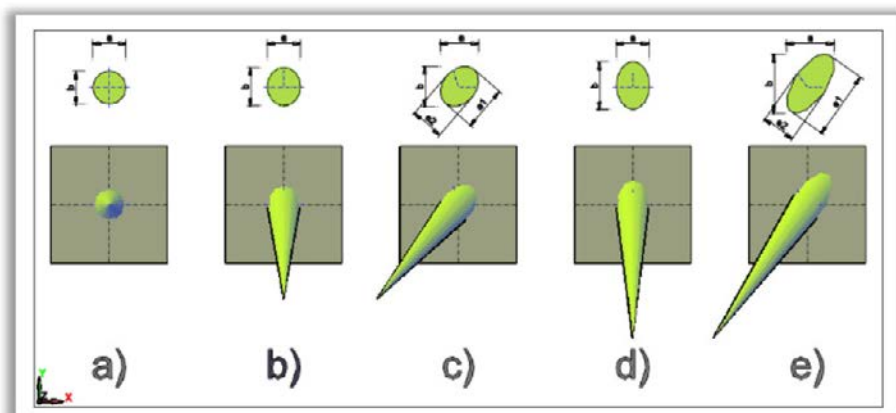
Las posiciones óptimas para el estacionamiento del escáner se deben elegir de manera que garanticen una máxima cobertura y precisión y, al mismo tiempo, se minimice el número de inicializaciones. La precisión de la medición depende del diámetro de la huella del láser, teniendo en cuenta además que el ángulo de incidencia y el alcance son de gran importancia para determinar la posición del escáner. La siguiente lista proporciona un conjunto de reglas prioritarias a tener en cuenta cuando se determina la posición óptima del escáner.



*Ilustración 46. Estacionamiento del láser escáner.*

- Comprobar que las posiciones cubren el mayor área posible sin obstáculos en la línea de visión y que se producen las menos sombras posibles.
- Comprobar que se cumplen los alcances mínimo y máximo para alcanzar la precisión requerida. Cuanto mayor sea la distancia al objeto, menor será la precisión y la resolución.

- Minimizar la aparición de pequeños ángulos de intersección. Con ángulos muy agudos el haz láser no se refleja tan bien, por lo que la precisión del escáner es menor.



*Ilustración 47. Elipses de error en relación al ángulo de incidencia sobre la superficie a medir.*

- Intentar reducir el número de estacionamientos.

Otros factores importantes que hay que tener en cuenta son:

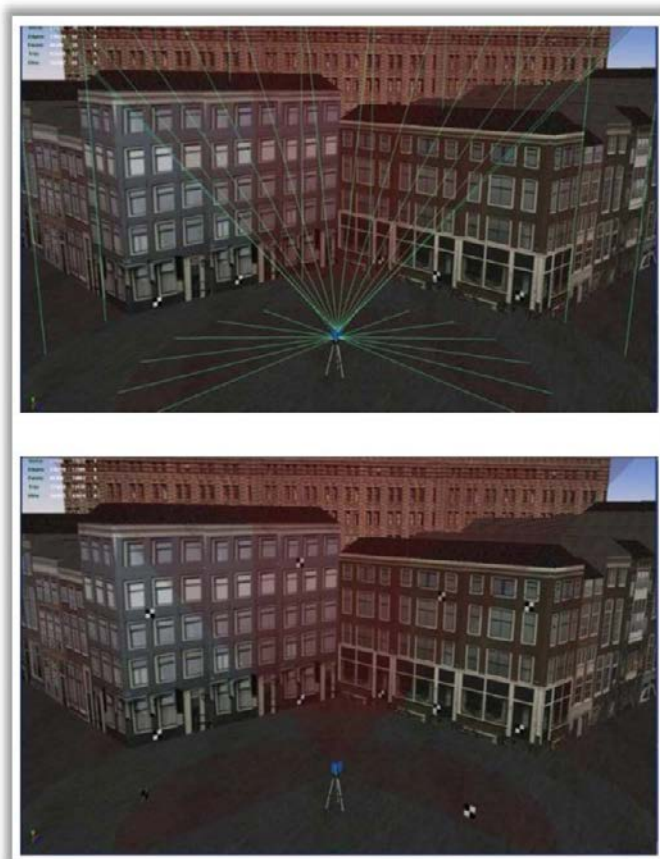
- Seguridad y salud.
- El entorno (vibraciones, viento...).
- Elevación del escáner sobre el suelo.
- Visibilidad de los puntos de referencia artificial o natural.

### **3.2.4. Determinación de las posiciones óptimas de los puntos de referencia**

Junto a las posiciones óptimas del escáner, los tipos de puntos de referencia y sus posiciones, y/o configuración geométrica, también son importantes. Los puntos de referencia se usan principalmente para registrar los escaneados realizados desde diferentes posiciones. Actualmente hay una gran variedad de dianas disponibles: reflectantes, esféricas, de papel, prismas... En el futuro, habrá dianas incluso con receptores GPS.

Uno de los puntos más importantes cuando se utilizan las dianas es que tienen que estar esparcidas lo más ampliamente posible, no sólo en las direcciones de los ejes X e Y, sino también en la dirección del eje Z. Esto se olvida frecuentemente y todas las dianas se colocan simplemente en el suelo.





*Ilustración 48. Posicionamiento de los puntos de referencia.*

Algunas configuraciones de las dianas no producen una solución única cuando se realiza el registro. Por ejemplo, si todas las dianas están en una línea, tenemos un grado de libertad, la rotación en torno a esa línea.

Frecuentemente las empresas comerciales de los escáneres proporcionan dianas especiales reflectantes y esféricas. Estas dianas están diseñadas para reflejar la mayor parte del haz láser. El escáner puede, entonces, detectar automáticamente estas dianas y, tras un escaneado de mayor resolución, determinar el centro exacto ajustando una superficie primitiva a la nube de puntos medida.

Algunas veces se emplean dianas de papel dado su bajo coste. En otras ocasiones se coloca un prisma reflectante sobre el escáner. Conociendo la distancia entre el espejo del escáner y el prisma, se puede determinar la posición del escáner midiendo el prisma con una estación total.



Ilustración 49. Ejemplos de puntos de referencia.

Mills and Barber establecen que, dependiendo de la técnica de registro empleada, debe haber al menos 4 puntos de referencia/dianas bien distribuidas en cada escaneado.

### 3.2.5. Gestión de los datos

La gestión de datos debe ser considerada cuando empieza la planificación del levantamiento. Un escáner láser captura miles de puntos por segundo y, por tanto, los conjuntos de datos se hacen muy grandes en poco tiempo. Por esto, se necesita un equipo capaz de almacenar, procesar y archivar los datos.

Para entender el almacenamiento de los datos, es necesario conocer los formatos de fichero más comunes. Los formatos de los ficheros determinan la precisión y la cantidad de información que se puede almacenar en el archivo. Algunos formatos guardan las coordenadas con precisión simple en punto flotante (32 bits), mientras otros lo hacen con precisión doble en punto flotante (64 bits). Cuando se almacenan las coordenadas euclídeas relativas o absolutas de los puntos, esto puede no ser importante, pero algunos escáneres almacenan sus datos en coordenadas polares. Con este tipo de coordenadas, un incremento de ángulo de 0.01 grados significa un incremento de 1cm a una distancia de 50m. En este caso, la precisión del punto flotante es muy importante. Estas diferencias se deben tener en cuenta cuando se realiza una conversión entre diferentes formatos.

Algunos formatos sólo contienen la información del punto (coordenadas x, y, z), mientras otros añaden más información como el color o la reflectividad, las normales de los puntos, la posición del escáner, etc.

Los formatos más comunes para el almacenamiento de nubes de puntos son:

- DXF: formato de *AutoCad*.
- PTX: formato de texto ordenado de *Leica* que contiene las coordenadas x, y, z, la reflectividad y el color. Algunas veces también contiene la posición del escáner.
- PTS: formato de texto no ordenado de *Leica* que contiene las coordenadas x, y, z, la reflectividad y el color.
- XYZ: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas x, y, z.

- XYZRGB: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas x, y, z y los valores de color (RGB) para cada punto.

Como el escáner láser captura grandes cantidades de datos, se toman muchos más puntos de los realmente necesarios, aunque éstos pueden utilizarse más tarde. Por lo tanto, es muy importante archivar los datos y mantenerlos accesibles por un largo periodo de tiempo. El hecho de archivar datos se ha convertido, en sí mismo, en un problema importante no sólo en el caso de los escaneados láser.

Cuando se archiva, es muy importante añadir metadatos para saber qué es lo que se ha escaneado y cómo se ha almacenado o procesado. Según el English Heritage, los metadatos se deberían subdividir en metadatos del escaneado, del proyecto, del registro e información del apoyo.

- Metadatos del escaneado:
  - Nombre del fichero y datos crudos.
  - Fecha de la toma.
  - Sistema de escáner utilizado (con el número de serie del fabricante). Nombre de la compañía.
  - Nombre del monumento.
  - Número del monumento (si se conoce).
  - Número del levantamiento (si se conoce).
  - Número del escaneado (número único para este levantamiento).
  - Número total de puntos.
  - Densidad de puntos en el objeto (con la distancia de referencia). Condiciones meteorológicas durante el escaneado (sólo en escaneados al aire libre).
  - Nombre del fichero de una imagen, tomada desde el mismo punto y mostrando los datos tomados. El nombre debe ser el mismo que el del fichero de los datos crudos.
- Metadatos del proyecto:
  - Nombre del fichero(s) con los datos crudos utilizados en el registro.
  - Fecha de toma (mes y año).
  - Sistema(s) de escáner utilizado (con el número de serie del fabricante(s)).
  - Nombre de la compañía.
  - Nombre y número del monumento (si se sabe).
  - Número del levantamiento (si se sabe).
  - Número de escaneados individuales.
  - Números total de escaneados.
  - Número total de puntos.
  - Nombre del fichero con los datos de apoyo.

- Descripción del método de registro (por ejemplo: “Todos los escaneados se registran respecto a una malla local utilizando dianas”).
  - Un plano de guía para mostrar los datos tomados con puntos individuales nombrados.
  - Condiciones meteorológicas durante el levantamiento (sólo en escaneados al aire libre)
  - Cualquier otra información específica.
- Información del registro (para cada estacionamiento del escáner):
- Traslaciones en los ejes X, Y y Z necesarias para transformar el escaneado original a la posición del escáner.
  - Rotaciones alrededor de los ejes X, Y y Z. Se deberían realizar en el orden X, Y, Z.
- Información de apoyo:
- ID del punto, X, Y, Z,  $\sigma_{DX}$ ,  $\sigma_{DY}$ ,  $\sigma_{DZ}$  y comentario (opcional).

El medio y el formato en que se almacenan los datos para un uso posterior, determina si los datos podrán ser leídos en 10 años o incluso en 50. Medios de almacenamiento actuales como los discos duros externos, CD-Roms, incluso el BlueRay tienen la posibilidad de almacenar grandes cantidades de datos, pero la duración de su vida es incierta. Por tanto, es necesario hacer copias de seguridad cuando su vida esté casi finalizada. El formato debería ser lo más simple posible (archivos de texto por ejemplo) y contener la máxima información posible, lo que implicaría archivos de gran tamaño.

### 3.3. TRABAJO PREVIO EN CAMPO

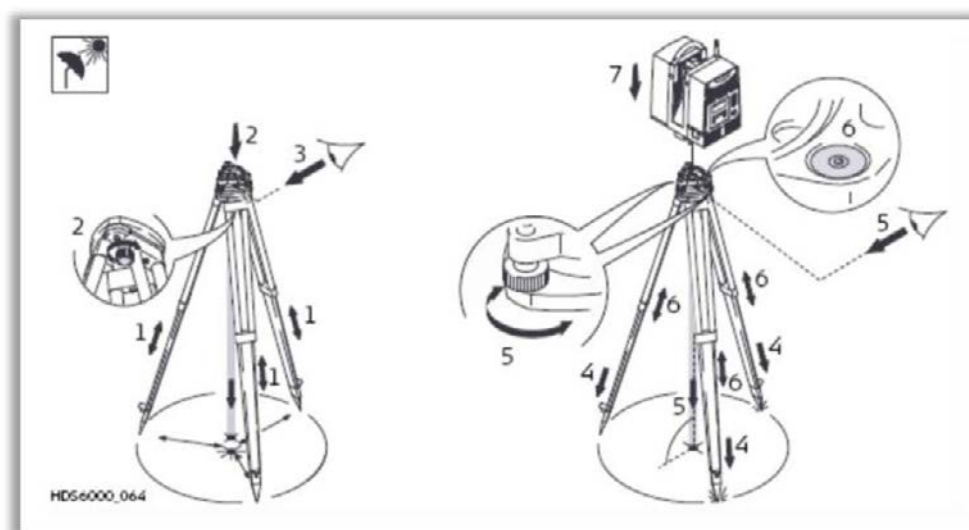
#### 3.3.1. Preparación del levantamiento

La fase de preparación del levantamiento incluye la toma de decisión de la técnica de registro a usar. Estas técnicas se pueden subdividir en tres categorías: registro mediante resección de dianas escaneadas, registro mediante estacionamiento en puntos de referencia conocidos y registro utilizando constreñimientos punto a punto.

#### 3.3.2. Estacionamiento del escáner

El estacionamiento de un escáner sigue generalmente un procedimiento similar al de una estación total. Se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Montaje del trípode: Se abre el trípode y se extienden sus patas. Hay que asegurarse de que el trípode está en un suelo estable. Normalmente, el escáner se coloca a la altura de los ojos. Cuando la superficie del suelo tiene que ser escaneada es mejor una posición más alta porque proporciona un mejor ángulo de inclinación.
- Sujetar el escáner al trípode colocándolo sobre él y anclándolo.
- Dependiendo de la técnica de registro, el escáner se deberá poner sobre un punto de referencia conocido.
- Nivelar el escáner. Variando la longitud de dos de las patas del trípode, se nivela la superficie superior utilizando niveles tóricos. La burbuja debe estar dentro del círculo interior. Hay que ser lo más precisos posible. Cuando se estaciona sobre un punto de referencia, este procedimiento no debe alterar el punto sobre el que hemos estacionado.



*Ilustración 50. Estacionamiento del láser escáner sobre trípode.*

### **3.3.3. Conexión del escáner**

Antes de encender el escáner, lo normal es que éste deba estar conectado a un ordenador portátil que pueda recibir y almacenar todos los puntos que tome el escáner y controle sus propiedades. La energía se puede suministrar mediante baterías, un generador o directamente de la red eléctrica. Estos son los pasos para conectar un escáner a un ordenador:

- Conectar el escáner al ordenador mediante el cable apropiado (cable de red estándar para los escáneres viejos o un cable FireWire para los más nuevos).
- Conectar la batería al escáner.
- Quitar la tapa de la lente del escáner y desbloquear el escáner (la mayoría de los escáneres panorámicos tienen una llave de bloqueo para protegerlos de movimientos mientras se transportan).
- Encender el escáner y esperar a que se caliente.
- Abrir el programa desde el ordenador portátil.
- Establecer la conexión entre el ordenador y el escáner (mediante dirección IP, cable USB, conexión wireless...).
- Abrir el programa de control del escáner e inicializar la conexión.

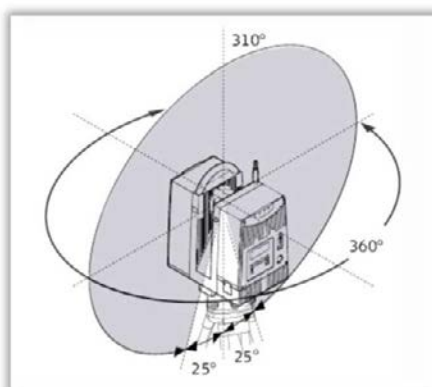
Los escáneres de última generación están integrados en su totalidad, es decir, combinan un controlador, el almacenamiento de los datos y la batería en una sola pieza.

### **3.3.4. Ajustes del escáner**

Cuando el programa de control ya ha establecido conexión con el escáner, hay que especificar los parámetros que se van a usar en el proceso de escaneado.

#### **- Definición del área a escanear**

Aunque la mayoría de los escáneres actuales pueden escanear 360° totalmente, esto no siempre es necesario. Por tanto, necesitamos definir el área a escanear. Para ello existen varias opciones.



*Ilustración 51. Campo visual del láser escáner.*

Algunos escáneres tienen un panel de control minimizado integrado que puede definir el área a escanear. Esta forma es muy aproximada, pero muy rápida.

Generalmente, el área a escanear se define mediante el control del escáner en el programa. Con este método, primero se captura una imagen de la escena y luego seleccionamos sobre la imagen el área a escanear. Hoy en día, los escáneres llevan cámaras o incluso videocámaras integradas que muestran al usuario lo que se está escaneando.

Muchos de los escáneres basados en la medida de fase no llevan cámara a causa de su diseño técnico. Sin embargo, estos escáneres pueden tomar tantos puntos por segundo que crear un escaneado a baja resolución tarda lo mismo que otro escáner en tomar las fotografías. Este escaneado a baja resolución se puede utilizar para seleccionar el área a escanear.

### **- Resolución**

La cuestión clave cuando se utiliza un escáner es elegir la correcta resolución. La resolución se define como la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, y de esta manera determina la densidad de puntos de la nube. Frecuentemente se confunde precisión con resolución. Aunque hay una cierta relación entre ambos términos, definen aspectos diferentes del proceso de escaneado.

La resolución queda determinada por el detalle de menor tamaño que se necesita reconocer en el resultado final. Por tanto, está directamente relacionado con la escala del resultado. De hecho, los escáneres láser superan el proceso inteligente que hacemos los humanos cuando analizamos un edificio (por ejemplo dividir un edificio en planos, líneas y puntos) al tomar una gran cantidad de puntos con información redundante. Por ejemplo, en áreas suaves como planos se necesitan menos puntos para modelar el objeto, mientras que en superficies con mayor curvatura se necesitan muchos más puntos, incluso a veces más de los que el escáner nos puede dar.

Hay que decir que cuanto más alta sea la resolución, se necesitará escanear más puntos y, por tanto, se tardará más. Además del tiempo, el tamaño de los datos almacenados también aumenta. Se debe tener presente que escaneando con una resolución mayor que la precisión de cada punto se puede producir un muestreo excesivo y el resultado es más ruido en el conjunto de datos final.

Como la mayoría de los escáneres trabajan con un ángulo constante entre dos puntos consecutivos (basado en coordenadas polares), la resolución del escáner estará definida para una cierta distancia al escáner. Esta distancia se puede introducir manualmente a través del software, o se captura la distancia a un punto y se define la resolución a esa distancia del escáner. Los puntos escaneados a una distancia mayor tendrán una resolución menor, mientras que los puntos más cercanos tendrán una resolución más alta. Generalmente, se aconseja tomar un punto de muestra en la zona más alejada del escáner.

Algunos programas de control del escáner nos dan rápidamente los ajustes para la resolución, como por ejemplo, la resolución más baja, la media y la más alta. Estos ajustes rápidos establecen un valor de resolución para una cierta distancia. En el manual del escáner, aparecen tablas que muestran la resolución efectiva a varias distancias para cada configuración de ajustes.

English Heritage, una institución del Reino Unido con bastante experiencia en la gestión de entornos históricos, creó una tabla que ayuda a determinar la apropiada resolución para un proyecto.

feature size	example feature	point density required to give 66% probability that the feature will be visible	point density required to give a 95% probability that the feature will be visible
10000mm	large earth work	3500mm	500mm
1000mm	small earth work/ditch	350mm	50mm
100mm	large stone masonry	35mm	5mm
10mm	flint galleting/large tool marks	3.5mm	0.5mm
1mm	Weathered masonry	0.35mm	0.05mm

Ilustración 52. Relación de distancias y resoluciones.

Esta tabla se basa en la siguiente fórmula:

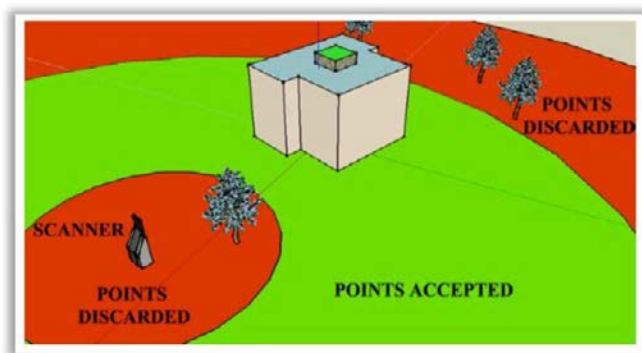
$$Q = 1 - \left(\frac{m}{\lambda}\right)$$

Donde  $Q$  es la calidad de los datos,  $m$  la densidad de puntos (resolución) sobre el objeto y  $\lambda$  el tamaño del elemento más pequeño o la densidad de puntos requerida. Por tanto, el valor de  $Q$  indica el nivel de objeto escaneado.

#### - Filtrado inicial

Mientras se escanea, los datos pueden filtrarse utilizando filtros primarios, a veces también llamados filtros de hardware. Para ello existen diferentes opciones: filtrado por distancia, por el valor de la reflectividad, o una combinación de ambos. Estos filtros primarios se pueden usar para asegurar que los datos se encuentran dentro del rango de distancias de precisión límite del escáner o para eliminar los puntos con poca reflectividad, porque seguramente no tendrán bastante precisión.





*Ilustración 53. Rango de puntos aceptables e inaceptables en la medida con láser escáner.*

### **3.4. TOMA DE DATOS**

#### **3.4.1. Escaneado de un objeto o edificio**

Una vez se ha determinado el campo de visión y se ha fijado la resolución más adecuada, se puede empezar a escanear. El proceso de escaneado es totalmente automático. Tras apretar el botón en el programa de control del escáner, o directamente en el control del escáner, éste se mueve al punto de inicio y empieza a tomar puntos. Estos puntos se almacenan en el ordenador portátil o en la memoria interna del escáner. Cuando el ordenador portátil está conectado al escáner, los puntos se visualizan directamente en tres dimensiones en la pantalla y dan una vista del área que se está escaneando. Después del escaneado, es conveniente comprobarlo por si hubiera obstrucciones imprevistas que provoquen zonas ocultas en los datos.

En la mayoría de los programas de control del escáner, la definición de la zona de escaneado y los parámetros de los ajustes pueden programarse de manera que se pueden escanear múltiples regiones de forma consecutiva con diferentes resoluciones. Se puede crear un script para que se escaneen unas áreas específicas con una mayor resolución mientras que el escáner está trabajando, de modo que los elementos mejor definidos se usen en el registro.

Según la resolución elegida y el área escaneada, el proceso de escaneado puede durar desde los 5 hasta 120 minutos o incluso más. Durante este tiempo es apropiado tomar notas del levantamiento o hacer un croquis del entorno, si no se hicieron en la fase de planificación. El croquis y las notas del levantamiento deberían mostrar y describir los objetos escaneados, las posiciones de las dianas numeradas y los estacionamientos del escáner, así como condiciones externas específicas que puedan influenciar el escaneado y los ajustes establecidos.

#### **3.4.2. Escaneado de las dianas u otros puntos de referencia**

Cuando se utilizan puntos de referencia, artificiales o naturales, para registrar las nubes de puntos, estos puntos se deben etiquetar y medir con mucha precisión.

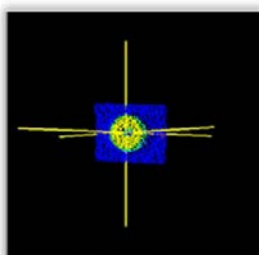
Debido a la velocidad limitada de los escáneres basados en tiempo de vuelo, el escaneado se realiza en dos fases. Primero, el objeto se escanea con una resolución adecuada para obtener la resolución pedida en los resultados finales. En una segunda fase, las dianas se escanean a mayor resolución para obtener una mayor precisión en la determinación de su centro. Sin embargo, en sitios al aire libre es mejor que se escaneen primero las dianas y luego el objeto para evitar cualquier movimiento de las dianas.

Después de terminar el escaneado global (primera fase), muchos programas de control tienen herramientas para detectar automáticamente las dianas. Como estas dianas están hechas de un material altamente reflectante, su valor de reflectividad es mucho mayor que el de los puntos a su alrededor. Sin embargo, como estas herramientas automáticas a menudo dan resultados erróneos, es aconsejable que siempre se comprueben los resultados y nos aseguremos de que no se queda ninguna diana por tomar.



*Ilustración 54. Diana sobre trípode.*

Una vez conocemos las posiciones aproximadas de las dianas, se procede a realizar el escaneado con una resolución muy alta. El programa de control del escáner puede ajustar automáticamente una forma específica de la diana y determinar su centro exacto.



*Ilustración 55. Escaneado de alta resolución sobre diana.*

Algunas veces se utilizan puntos de detalle en lugar de dianas, o bien ambas. Un punto de detalle es un punto geométrico altamente distinguible y que puede ser localizado con mucha precisión gracias a su forma. Estos puntos también se deben escanear con una resolución muy alta. Es bueno poner manualmente el vértice para estos puntos de referencia naturales y etiquetarlos en el momento para evitar problemas de interpretación en la fase de procesamiento.

Es importante saber que la última generación de escáneres basados en diferencia de fase escanean a muy alta velocidad los 360°, y a resolución muy alta puede tardar entre 5 y 10 minutos. Las dianas se escanean ya en esta fase a alta resolución, por lo que no tienen que ser escaneadas de nuevo. Esta forma de trabajar es bastante más rápida porque no hay que identificar las dianas y volver a escanearlas a mayor resolución. Sin embargo, el etiquetado de las dianas suele hacerse en la oficina y ello requiere disponer de notas adecuadas y de croquis de campo.

### **3.4.3. Medición de puntos de referencia o dianas**

Una parte del proceso de escaneado es tomar las dianas con una estación total. Si se realizan varios estacionamientos con la estación total, se debe hacer una triangulación o poligonación para minimizar los errores. Este proceso no se va a detallar, ya que el presente documento va dirigido a usuarios con conocimientos básicos en topografía.

#### **3.4.4. Comprobación de la captura de datos**

Como ya se ha mencionado, es muy importante comprobar dos veces que el escaneado está completo cuando se haya terminado. Si nos damos cuenta de que falta una parte cuando ya estamos en la oficina, será necesario volver al campo, con los gastos que ello puede suponer. Esta segunda comprobación requiere más tiempo que la comprobación realizada en el momento. Cuando se trabaja con un ordenador portátil, una vista simplificada nos puede ayudar.

### **3.5. PREPARACIÓN DE DATOS**

De vuelta a la oficina, los datos se analizan y comparan con los croquis de campo y las notas. Es aconsejable empezar a trabajar con una copia de los escaneados originales y mantener los originales como copias de seguridad. Los diferentes tipos de escáneres almacenan las nubes de puntos de diferentes formas. En tareas de almacenamiento es importante que el formato del archivo sea fácilmente accesible y reconocible. Si se puede acceder a él directamente, sin decodificación, después se podrá convertir a cualquier otro formato legible con un programa adecuado. El formato del fichero también debe contener los datos en el formato más rudimentario, en lugar de usar únicamente el formato preferido para el reprocesamiento.

Siempre se deben añadir los metadatos a las copias de seguridad, junto con los croquis y las notas de campo así como todos los datos recopilados en la fase de preparación.

Antes de procesar las nubes de puntos, los escaneados afectados por condiciones ambientales extremas o los escaneados erróneos ocasionados por fallos humanos se eliminan del conjunto de datos. Las nubes que no se eliminan se deben priorizar según las “mejores vistas”. El orden de prioridad se establece a partir de los croquis y las notas de campo.

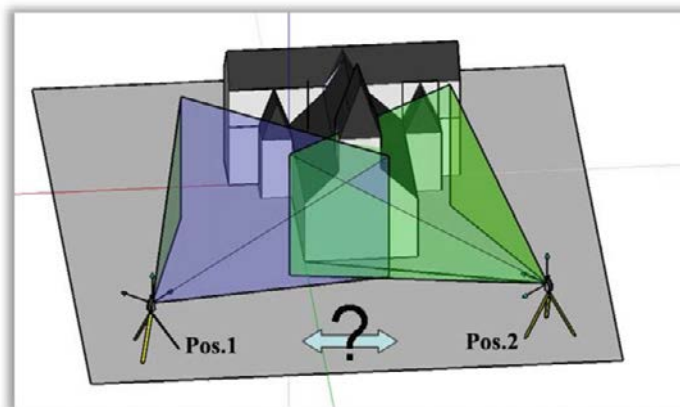
En algunos casos, también hace falta limpiar las nubes de puntos antes de registrarlas. Los escaneados de alta resolución de las dianas pueden estar llenos de ruido cuando las dianas se han colocado muy lejos del escáner o cuando las condiciones ambientales son malas. Este ruido se debe eliminar antes de realizar el registro, ya que, en caso contrario, afectará a la precisión del mismo.

### **3.6. REGISTRO Y GEORREFERENCIACIÓN**

En la mayoría de casos, el objeto escaneado es demasiado grande para que se escanee desde una única posición, por lo que son necesarios varios estacionamientos del escáner. Cada estacionamiento está definido en el sistema de coordenadas del escáner. Para poder alinear diferentes estacionamientos del equipo, es necesario saber la situación y la orientación exacta del mismo en un sistema de coordenadas externo, local o global.

Para realizar el registro, que es la unión de las diferentes nubes de puntos, necesitamos transformar sus coordenadas a ese sistema único y común. Para esta transformación, es necesario calcular sus parámetros y será necesario conocer las coordenadas de una serie de puntos homólogos en los sistemas de coordenadas implicados.

El problema de la tecnología láser escáner es que no registra puntos singulares como esquinas o centros geométricos, de modo que, para realizar el proceso de transformación de coordenadas del sistema instrumental al sistema de coordenadas común, necesitaremos usar las herramientas que ofrece el software propio del fabricante.



*Ilustración 56. Situación relativa de los estacionamientos.*

Directamente vinculado con la alineación o registro, se encuentra la georreferenciación de todo el conjunto de datos. A continuación se explican las diferentes posibilidades para llevar a cabo el registro y la georreferenciación.

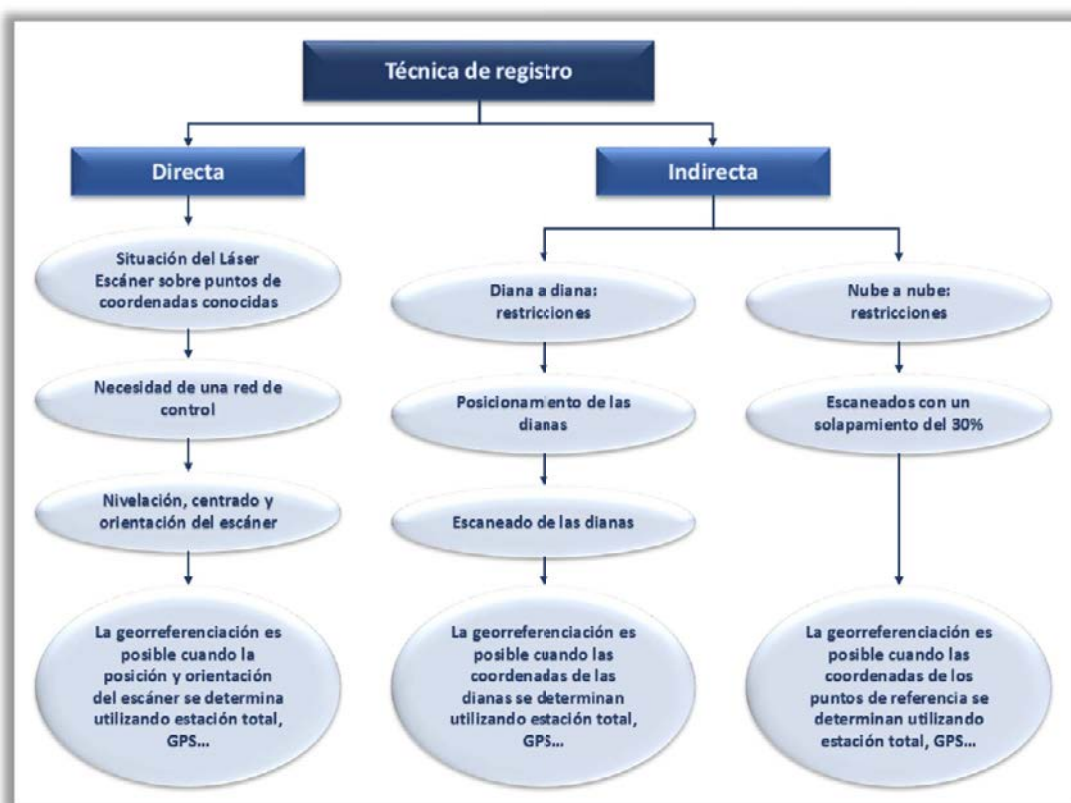


Ilustración 57. Clasificación de las técnicas de registro.

### 3.6.1. Registro y georreferenciación indirectas

El registro indirecto conlleva el uso de dianas (artificiales o naturales) en el escenario para alinear las nubes de puntos. Si se necesita georreferenciar se deben medir los puntos de referencia mediante técnicas topográficas y transformarlos a un sistema de coordenadas conocido.

Para llevar a cabo el registro indirecto se necesita, como mínimo, tres puntos de referencia presentes en las dos nubes de puntos a registrar. Sin embargo, siempre es mejor tener más de tres puntos, ya que de esta manera los errores se pueden minimizar mediante un ajuste mínimo cuadrático.

#### - Registro diana a diana

Los lugares con fácil acceso no presentan problemas a la hora de colocar las dianas. Las dianas artificiales pueden ser de formas muy variadas. Hay dianas especiales que las suministran las propias compañías de láser escáner hechas de material altamente reflectante. No obstante, las dianas impresas en papel también se pueden utilizar. Cuando no hay dianas artificiales disponibles, se improvisan tomando objetos cuya superficie pueda ajustarse a un superficie geométrica ideal. Por ejemplo, se pueden utilizar piezas de tubo cilíndrico. Los programas de procesamiento del escáner permiten ajustar un cilindro a la nube de puntos del objeto para determinar su eje central con gran precisión. Si los cilindros se colocan tanto en dirección vertical como en horizontal, se pueden utilizar para alinear diferentes nubes de puntos.

En las zonas inaccesibles, por ejemplo en zonas muy elevadas, se pueden utilizar entidades naturales. Estas entidades o blancos naturales son puntos de interés en la propia estructura a escanear que pueden ser identificados con alta precisión, como por ejemplo bordes de ventanas o cornisas. Según el English Heritage, el resultado del registro con blancos naturales es peor que el realizado con dianas artificiales. La razón es doble:

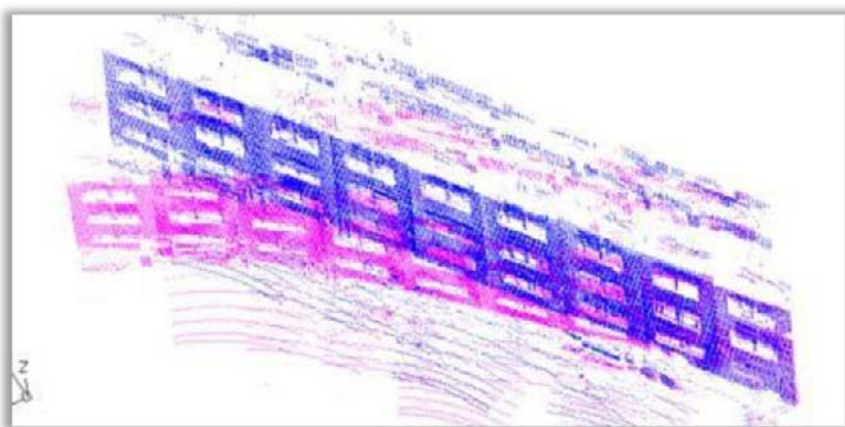
- Los entidades comunes en dos nubes de puntos diferentes no se componen de puntos idénticos, que son, esencialmente, círculos de varios milímetros de diámetro, debido a la divergencia del haz láser.
- La identificación de entidades comunes es bastante subjetiva, especialmente en escaneados muy inclinados.

#### **- Registro nube a nube**

Otra forma de registrar dos nubes de puntos es usando el solape entre ellas. Si dos nubes de puntos tienen bastante solape (generalmente entre el 30% y el 40%), se puede utilizar la técnica llamada ICP (Iterative Closest Point) para alinear ambos conjuntos de datos. Esta técnica requiere que el usuario marque al menos tres pares de puntos correspondientes en las nubes de puntos. Como estos tres pares nunca serán exactamente los mismos puntos (ver el apartado anterior), el algoritmo ICP comprueba iterativamente las distancias entre todos los puntos de las nubes y estima la transformación para alinear ambos conjuntos de manera que se minimice el error.

Las reglas para las configuraciones de las dianas mencionadas en el apartado anterior son aplicables a la configuración de los puntos en el registro nube a nube.

Esta técnica de registro se debe emplear con precaución. Cuando se escanean estructuras lineales muy largas en las que se necesitan varios estacionamientos, pequeños errores en el registro de cada par consecutivo de nubes de puntos se pueden propagar y producir errores globales grandes.



*Ilustración 58. Ejemplo de propagación de errores entre pares consecutivos de nubes de puntos.*



### **- Registro superficie a superficie**

En 2006, A. Gruen publicó una nueva técnica para alinear nubes por medio de ajuste de superficies geométricas de dos escaneados. Su algoritmo estima la distancia euclídea entre fragmentos de superficies por medio de mínimos cuadrados e intenta minimizar estas distancias de forma iterativa, al igual que en el algoritmo ICP. Este método ofrece una alta flexibilidad para cualquier tipo de problema de correspondencia en superficies 3D, así como herramientas estadísticas para el análisis de la calidad del resultado final.

El registro superficie a superficie es especialmente útil cuando algunas nubes contienen ruido sustancial. En este caso, es mejor limpiar las nubes primero y triangularlas por separado de manera que cada una se procese con los ajustes más adecuados. Cuando todas las nubes se han transformado en superficies, se puede emplear el registro superficie a superficie para alinear los distintos escaneados.

### **3.6.2. Registro y georreferenciación directas**

El registro directo significa que la posición y orientación del escáner se calculan directamente. Esto se puede realizar de dos maneras.

Una forma sería utilizando un escáner láser con algunas funciones de estación total, donde el escáner se puede estacionar directamente sobre un punto conocido utilizando una plomada láser. La orientación se puede determinar escaneando un único punto de referencia en el emplazamiento siguiente del escáner. Estos escáneres también tienen un compensador de doble eje que los nivela dentro de unos límites. Esta nivelación del escáner implica una tercera restricción en la orientación del escáner.

A veces se fija un reflector especial en la parte superior del eje vertical de rotación del escáner. La posición exacta de este reflector respecto del centro del haz láser se puede determinar tras un proceso de calibración. Entonces, el reflector se puede medir con una estación total como si formara parte de una poligonal.

Otra forma de determinar el emplazamiento del escáner es colocando un receptor GPS sobre el escáner. Esta técnica reduce el número de dianas a considerar y, por tanto, evita los grandes requerimientos en cuanto a la configuración de las mismas. Además, no se necesita que las nubes de puntos se solapen. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, esta técnica es normalmente más rápida que el registro indirecto.

Cuando se necesita georreferenciar, la posición del reflector se puede transformar a un sistema de coordenadas conocido mediante técnicas topográficas.

### **3.6.3. Aspectos generales del registro y georreferenciación directa**

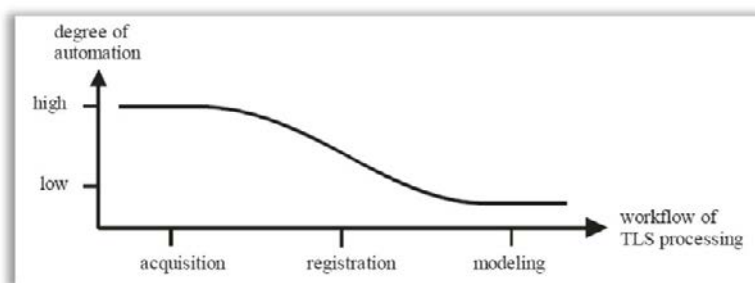
Este apartado proporciona algunos consejos a tener en cuenta cuando se registra un conjunto de datos o, incluso, cuando se planifica la fase de registro. La mayoría de las siguientes afirmaciones se han adoptado de la publicación del English Heritage.

- Cuando se realiza un registro, se debe asegurar que los residuos del registro global sean iguales o mejores que la precisión geométrica requerida para los resultados finales.
- Cuando el registro se realiza únicamente mediante resección (indirecto), cada nube de puntos debe contener, al menos, cuatro puntos de control XYZ distribuidos adecuadamente. Con esto se consiguen más grados de libertad y, por tanto, se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados para minimizar los errores en la captura de las dianas o blancos.
- Incluir siempre en el informe del levantamiento los residuos del proceso de registro y las precisiones geométricas de los parámetros calculados.
- Añadir fotografías o capturas de pantalla de elementos irregulares de las nubes de puntos producidos por quiebros o de elementos que se podrían malinterpretar como errores en el registro e indicarlo en el informe.
- No colocar dianas artificiales en lugares que oculten detalles importantes del objeto.
- Cuando se coloquen dianas sobre la superficie del objeto, hay que asegurarse que el adhesivo no daña la estructura.
- Evitar el uso de puntos en blanco natural, porque son menos precisos que las dianas artificiales.
- El programa de control del escáner tiene que estar adaptado a los tipos de dianas empleados. Por ejemplo, algunos tipos de dianas reflectantes muestran un halo alrededor del centro provocado por varios retornos de la energía del láser. Un programa adecuado puede reducir el conjunto de retornos del centro de la diana mediante una ponderación en función de la intensidad de cada retorno.
- Cuando se escanean dianas artificiales con un ángulo muy agudo, no se debe utilizar la identificación automática porque produce malos resultados.

### 3.7. PROCESAMIENTO DE NUBES DE PUNTOS 3D

El procesamiento de una nube de puntos hace referencia a la transformación de la nube de puntos *cruda* (datos directos de la observación) registrada en un resultado final. El resultado final puede adoptar varios formatos: nube de puntos limpia, planos 2D estándar (planos, elevaciones, secciones transversales...), modelos 3D totalmente texturizados para animaciones y navegación virtual.

Frecuentemente, las compañías de escáneres muestran videos impresionantes de nubes de puntos que se transforman en modelos texturizados en menos de un segundo. No obstante, este proceso es mucho más largo en la realidad y la mayoría de las veces manual. A continuación se muestra una visión de las diferentes fases del procesamiento del escaneado láser y su grado de automatización.



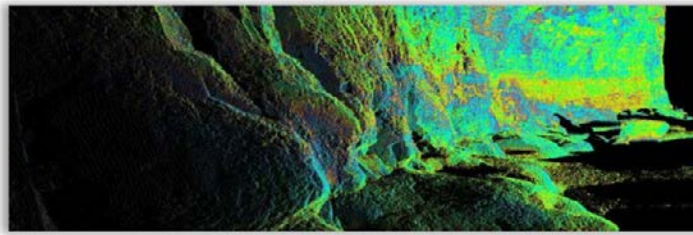
*Ilustración 59. Relación de las fases de procesamiento del escaneado y su grado de automatización.*

Generalmente, el procesamiento de una nube de puntos 3D se puede dividir en dos categorías. Los resultados finales se pueden extraer directamente de la nube de puntos sin más procesamiento, o creando primero un modelo 3D de la superficie a partir de la nube de puntos y extrayendo los resultados de este modelo. El método elegido dependerá de los resultados pedidos. Por ejemplo, cuando sólo se piden un número limitado de secciones transversales, es mejor extraerlas directamente de la nube de puntos. Sin embargo, cuando se necesita un mayor número de secciones (más de 50), el segundo método es más eficiente porque hay herramientas automáticas para generar múltiples secciones a partir de un modelo triangulado. Además, el modelo de la superficie añade más valor y comprensión que sólo la nube de puntos registrada.

#### 3.7.1. Representaciones de las nubes de puntos

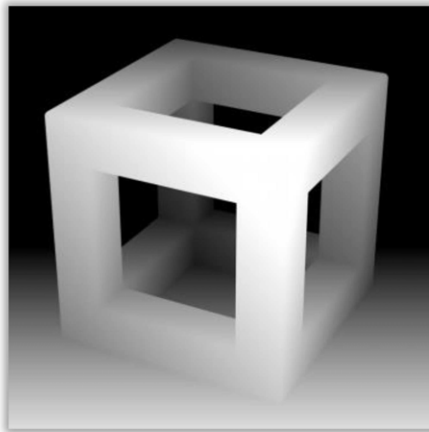
El resultado de una captura de un escáner es una gran cantidad de puntos en el espacio, cada uno con coordenadas X, Y, Z y, normalmente, un valor de reflectividad. Algunos escáneres proporcionan incluso información del color en forma de valores RGB (rojo, verde y azul).

La nube de puntos se puede representar dibujando todos los puntos en la pantalla, pero esto conlleva una impresión caótica y el usuario puede tener dificultades para reconocer las estructuras en la nube. Cuando cada punto se muestra con su valor de reflectividad o color, el conjunto de toda la estructura se entiende mejor.



*Ilustración 60. Representación de una nube de puntos según el valor de su reflectividad.*

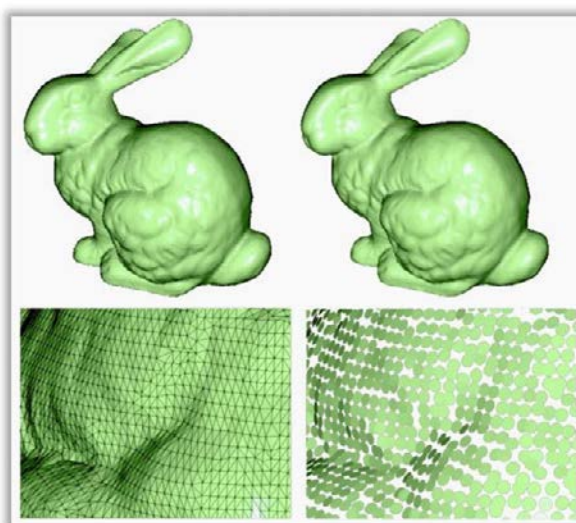
Como la mayoría de escáneres toman una escena en filas y columnas, una manera de representar una nube de puntos de una forma muy simple es con un mapa de profundidades. Un mapa de profundidades es una estructura en forma de matriz (2D) en la que cada píxel representa la distancia del punto 3D al escáner en forma de un valor de gris. Debido a que este tipo de representación incorpora información del entorno de cada punto, es de gran utilidad en los algoritmos de procesamiento de la nube de puntos y se conoce como nube de puntos organizada.



*Ilustración 61. Representación de una nube de puntos a partir de su mapa de profundidades.*

Utilizando complejos algoritmos de modelización (triangulación), los puntos vecinos se pueden conectar para formar superficies. Esto proporciona una representación más cercana a la realidad porque las estructuras superficiales o modelos no son transparentes y, por tanto, los puntos que quedan detrás de otros no pueden ser vistos. Calculando la dirección normal de la superficie, se pueden utilizar sombras artificiales para enfatizar detalles de la superficie.

Como la generación de modelos (especialmente a partir de nubes de puntos no organizadas) es compleja y puede tomar un tiempo considerable, ha habido intentos de encontrar alternativas para conseguir más rápidamente una representación aproximada de la nube sólo para visualizarla y analizarla. Como resultado, se lanzó la idea de *point splatting*, que generan “surfels” (“SURFace ELements”), que son pequeños elementos de superficie para cada punto de la nube creada a partir de los datos crudos del escáner láser. Cada surfel se representa mediante una pequeña forma primitiva de superficie (círculo, elipse...) en 3D que hereda la normal de la superficie que forma con sus vecinos. Esto resulta en una representación de la superficie muy rápida.



*Ilustración 62. Representación de una nube de puntos a partir de surfels.*

### **3.7.2. Mejora de los datos**

#### **- Filtrado de ruido**

Un primer paso en el proceso de mallado es la eliminación del ruido de los datos de la nube de puntos. Si el ruido se ha introducido a causa del viento, superficie de reflexión mala u otras causas, el modelo contendrá triángulos que conecten los puntos con ruido a los puntos correctos. Esto produce una malla llena de picos. Por tanto, es importante eliminar este ruido en el primer paso.

A menudo, el operador puede identificar fácilmente algunas partes escaneadas que no son necesarias en los resultados finales. Por tanto, es aconsejable que el operador lleve a cabo un primer análisis de la nube de puntos y elimine a mano todos los puntos no necesarios.

Los algoritmos automáticos que eliminan el ruido se basan, principalmente, en dos principios. El primero es el hecho de que los puntos que tengan a su alrededor otros pocos puntos o ninguno, son considerados ruido. Probablemente son originados por personas y otros obstáculos que se mueven por delante del escáner mientras el escáner está en funcionamiento. Estos puntos se identifican fácilmente utilizando un número limitado de parámetros de ajuste y, por tanto, eliminados de la nube de puntos.

Otro principio de eliminación es mover ligeramente los puntos para alcanzar una suavidad óptima de la superficie. Estos algoritmos intentan ajustar localmente planos a los puntos de la nube. Cuando el punto central queda muy lejos del plano ajustado, se mueve hacia el plano de manera que proporcione una mejor consistencia a sus vecinos.

También existen otros filtros de ruido, algunos especializados según el tipo de escáner, que eliminan puntos con errores sistemáticos. Por supuesto, se debe tener cuidado cuando se eliminan puntos ruidosos ya que pueden perderse entidades cuando se suaviza en exceso o cuando se eliminan demasiados puntos.

#### **- Remuestreo**

Como se ha mencionado anteriormente, cuando se crea una malla, el número de triángulos es más del doble del número de puntos. Un modelo de una nube de puntos de un escáner por fase puede tener más de 20 millones de triángulos fácilmente. Esta cantidad hace que sea difícil trabajar con programas estándar. Generalmente, se necesita reducir el número de triángulos antes de crear el modelo. Esta reducción de puntos se puede hacer de dos formas:

La manera más fácil de reducir el número de puntos es eliminar un punto que esté muy cerca de otros puntos. Los puntos se pueden eliminar mientras que se mantiene toda el área escaneada. Sin embargo, esta técnica puede eliminar puntos en áreas que contengan elementos importantes y, por tanto, que se elimine información valiosa.

Otra forma de eliminar puntos es teniendo en cuenta la curvatura de la superficie para determinar si parte de la superficie es suave o muy curva. Esta técnica de remuestreo funciona inteligentemente, manteniendo los puntos importantes en las áreas con alta curvatura y eliminando puntos en áreas que se pueden representar con menor cantidad. Con esta técnica se consigue una reducción más adecuada de la nube de puntos original sin perder elementos valiosos.

### **3.7.3. Modelización 2D directa a partir de las nubes de puntos**

Hacer modelos 2D directamente de las nubes de puntos es una cuestión de interpretación humana. La mayoría de los programas en este ámbito son módulos de paquetes CAD como *AutoCAD* o *Microstation*. Una interfaz especial permite al usuario cargar grandes nubes de puntos en estos programas para procesarlos con las herramientas CAD estándar. Programas comunes para realizar estas tareas son: *Leica CloudWorx*, *Kubit Pointcloud*, *LFM CAD Link...*

Las secciones transversales, planos y elevaciones se pueden generar tomando un corte fino de la nube de puntos y proyectando todos esos puntos sobre un plano. Luego el usuario tiene que dibujar manualmente o conectar los puntos creando líneas, arcos, etc. El usuario hace una interpretación de las esquinas y detalles más pequeños que la resolución del escáner. Esto es una tarea difícil y precisa que puede llevar un tiempo considerable. La persona que lleve a cabo esta tarea debe tener un conocimiento del edificio o estructura o tener material fotográfico a su disposición para hacer las interpretaciones correctas.

En algunos centros de investigación se han creado algoritmos para automatizar estas tareas. Algunos de estos algoritmos han resultado ser útiles, sin embargo necesitan ciertas restricciones para dar resultados satisfactorios. Esto significa que no se pueden usar de forma genérica y, por tanto, no están todavía implementados en los programas comerciales. Las elevaciones se pueden crear de dos maneras. Cuando hay información disponible sobre el color gracias a fotografías, o se dispone de los valores de intensidad, los puntos con color se pueden proyectar sobre un plano creando un ortofoto verdadera. Dibujando sobre la ortofoto se pueden obtener las elevaciones. Con este método, la precisión de la elevación depende en gran medida de la resolución del escáner.

Otra forma de crear las elevaciones es trazar los bordes importantes (ventanas, puertas, etc.) de la nube de puntos 3D y proyectar estas entidades 3D sobre un plano. Esta técnica requiere un buen conocimiento geométrico y la capacidad para reconocer rápidamente estructuras en nubes de puntos.

Algunos programas permiten registrar imágenes externas a la nube de puntos y utilizarlas para monoplotear. Así pues, la interpretación se realiza en la imagen y se extrae la información de profundidad de la nube de puntos. El problema con este tipo de programas es que el resultado debería comprobarse dos veces porque al trazar un borde en una imagen a menudo es malinterpretado por el programa debido a que falten datos y, por consiguiente, no se genere en la posición correcta.

### **3.7.4. Modelado 3D directo a partir de las nubes de puntos**

Cuando se conoce de antemano la forma de un objeto 3D y se puede describir con primitivas geométricas, que se pueden detectar automáticamente a partir de la nube de puntos. Cuando se ajustan estas formas geométricas a la nube de puntos, el algoritmo asume que es una forma ideal. Por ejemplo, el escaneado de una planta petroquímica se puede convertir fácilmente en un modelo 3D asumiendo que todas las tuberías tienen una sección circular y que las piezas de conexión también tienen una forma específica. La mayoría de estas aplicaciones se utilizan en la industria petroquímica.

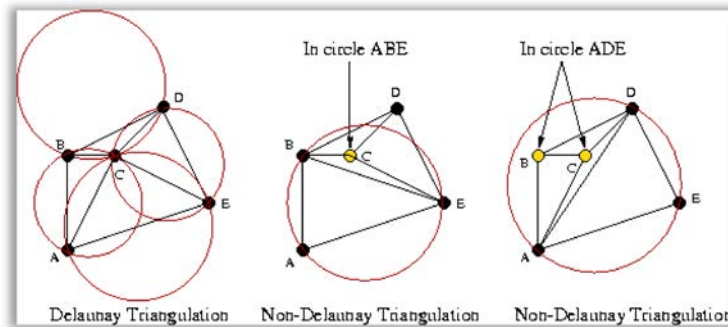
### **3.7.5. Modelado 3D de superficies complejas**

Generalmente, el producto final de un proceso de modelado 3D es una malla de la superficie del objeto. Conectando todos los puntos de la nube con pequeños triángulos, se genera un modelo de superficie o malla. Esta malla es una interpolación de los puntos tridimensionales que crea una representación completa de la superficie. Para crear un modelo de calidad, se deben seguir una serie de pasos:

- Limpieza de los datos (reducción del ruido, eliminación de errores groseros...).
- Remuestreo.
- Mallado/Triangulación.
- Eliminación de vacíos (puenteando, uniendo...).
- Optimización de la malla.

### - **Mallado/Triangulación**

Existen diferentes algoritmos para crear mallas a partir de nubes de puntos. Las conexiones entre puntos se realizan normalmente mediante triángulos o cuadriláteros. La técnica más popular de modelización con triángulos y tetraedros es la del criterio de Delaunay. Este criterio establece que ningún punto puede estar contenido en la esfera circunscrita en cualquier tetraedro del modelo, que ilustrado en 2D aparece reflejado a continuación.



*Ilustración 63. Criterio de Delaunay.*

En los últimos años se ha desarrollado algoritmos más complejos de modelado, como el algoritmo de la bola pivotante o el del desfile de cubos, que son capaces de triangular grandes conjuntos de datos con un bajo consumo de memoria.

### - **Eliminación de vacíos**

Se realizan múltiples estacionamientos diferentes del escáner para solucionar el problema de las oclusiones. Sin embargo, cuando se hace la malla se introducen pequeños agujeros o vacíos debido a una insuficiencia de datos. En los últimos años se han desarrollado numerosos algoritmos para eliminar estos vacíos. Estos algoritmos utilizan la interpolación para maquillar la falta de información. El agujero o vacío se puede rellenar de forma plana, conectando los bordes con triángulos, o utilizando una superficie curva de forma que los puntos y triángulos de los bordes se usen, tanto para crear nuevos puntos, como para rellenar el vacío por medio de una superficie suave.

### - **Optimización del modelo**

Aunque la nube de puntos se haya reducido durante el remuestreo para crear un menor número de triángulos, puede ser necesario reducir el número de triángulos de la malla en un segundo paso para no sobrepasar las capacidades del hardware. Esto se llama diezmado de la malla.



Otra forma de optimizar la descripción de la superficie es mediante la aproximación de superficies matemáticas. Uno de los tipos de superficies más comunes para estas tareas son las *NURBS* (*Non Uniform Rational Basis functions*). Éstas son representaciones matemáticas precisas de superficies con forma libre, como las formas de las carrocerías de los coches, los cascos de los barcos o incluso la cara humana. Tienen puntos de apoyo que dirigen la superficie. Sin embargo, estos puntos de apoyo no son necesariamente puntos de la nube.

### 3.7.6. Modelización 2D indirecta a partir de las nubes de puntos

El modelado 2D indirecto significa que se pueden obtener dibujos 2D a partir de objetos 3D modelados u objetos mallados. Esta técnica es útil cuando se tienen que hacer muchas secciones transversales, por ejemplo, una sección a cada centímetro para crear un mapa con curvas de nivel.

La modelización indirecta requiere una fase de modelado 3D. Una vez se ha creado un modelo, se puede cortar por planos para crear secciones transversales. La interpolación de áreas entre puntos medidos se hace de manera automática en la fase de modelado y no requiere que sea realizada por un operador.

### 3.7.7. Mapeado con textura

Una textura se mapea sobre la superficie de una forma o polígono. Para colocar correctamente la información de la textura se emplean mapas UV. En contraste con X, Y, Z, que son las coordenadas del objeto original 3D en el espacio modelo, U y V son las coordenadas del objeto transformado. El mapeado UV transforma los objetos 3D/mallas en imágenes planas en las que puede enlazarse información con textura. Esta transformación de malla también se puede describir como un desplegable de una forma 3D en un cánvas 2D.

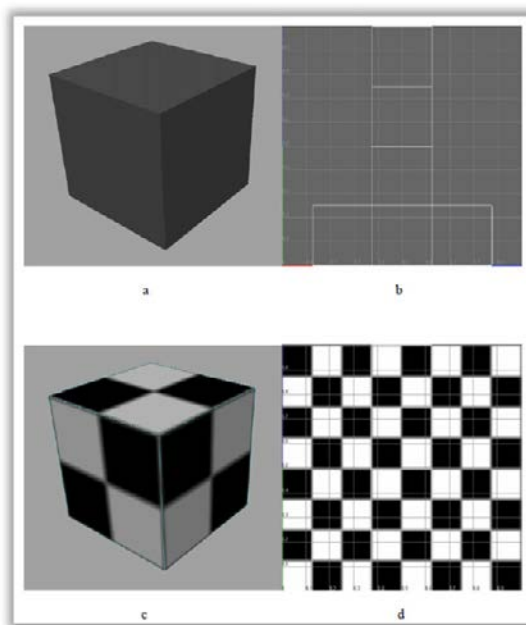
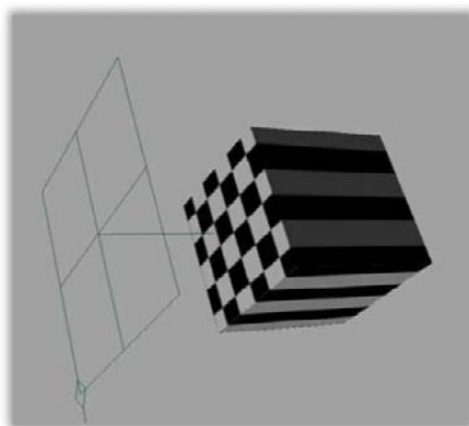


Ilustración 64. Mapeado con textura.

Cuando se crea un modelo como una malla de polígonos mediante un modelador 3D, se pueden generar las coordenadas UV para cada vértice de la malla. Una forma es que el modelador 3D despliegue el conjunto de triángulos por las juntas, poniendo automáticamente los triángulos sobre un plano. Un mapa UV puede ser generado automáticamente por la aplicación, de forma manual por el artista o una combinación de ambos. Los mapas más comunes son mapas de altitudes, mapas de normales, mapas de desplazamientos y mapas de sombras.

Una vez está creado el mapa UV, el usuario puede colorearlo y luego, proyectarlo sobre el modelo 3D.

En lugar de usar mapas UV, algunos programas tienen la opción de proyectar la textura sobre la superficie utilizando proyecciones ortográficas, lo que simplifica el proceso de texturizado:



*Ilustración 65. Proyección ortogonal de texturas.*

El despliegue es mejor que las proyecciones porque minimiza el estiramiento de la textura. Ambas técnicas se pueden usar de forma mixta en un modelo 3D.

El escaneado láser a menudo requiere una alta resolución fotográfica para la visualización de los modelos 3D. Los mapeados de alta precisión exigen conocer las posiciones y los parámetros internos de la cámara (focal, distorsión de la lente...) en relación al modelo. Los programas comerciales proporcionan algoritmos que permiten seleccionar manualmente puntos homólogos en la imagen y el modelo 3D para determinar estos parámetros desconocidos.

Existen, principalmente, dos algoritmos diferentes para proyectar fotografías sobre un modelo 3D: el mapeado con textura y el recubrimiento de textura. El recubrimiento de textura se puede describir como el proceso de poner la fotografía en un canevas elástico, para luego arrastrar y cubrir el modelo 3D. Esto implica que las áreas que no contengan mucha información o no aparezcan del todo en la fotografía (por ejemplo, superficies muy oblicuas) serán estiradas y, por tanto, no se texturizarán correctamente. El mapeado con textura resuelve este problema analizando primero las partes visibles en la imagen y luego, proyectando los píxeles visibles de las fotos en el modelo 3D.

El detalle de un mapa con textura depende de la resolución, que se define la mayoría de las veces como una potencia de dos (p. ej. 256x256, 512x512, 1024x1024) y que es lo mejor para la memoria gráfica. La nueva generación de tarjetas gráficas son más potentes y capaces de manejar texturas cuyas dimensiones no sean potencias de dos.

### **3.8. CONTROL DE CALIDAD Y ENTREGA**

La calidad de los levantamientos mediante escáneres láser necesita una consideración cuidadosa durante todo el proceso de medición y procesamiento. Cada vez que se estaciona el escáner para tomar datos (antes, durante y después) ciertos elementos de los datos deberían inspeccionarse y contrastarse con los resultados esperados o predichos. La mayoría de los aspectos técnicos que pueden influenciar la calidad de los datos han sido explicados en detalle anteriormente. Además de estos factores, el operador del escáner debe comprobar otros factores como que exista recubrimiento suficiente, que la distribución de los puntos tenga la resolución requerida, que las fotografías estén referenciadas con una cámara de alta resolución y que la adquisición de las dianas reflectantes sea correcta.

La calidad empieza con un completo conocimiento de las especificaciones del proyecto. Este conocimiento permite la correcta elección del escáner, de la resolución, del método apropiado de registro, etc. Por ejemplo, elegir un escáner que no tiene suficiente alcance, no usar las dianas necesarias ni los emplazamientos correspondientes, no permitir un solape apropiado (si se decide registrar los escaneados utilizando el recubrimiento), y lo que más importante, si la resolución no es la correcta, todo ello afectará directamente en la calidad del producto final.

La documentación adecuada en campo asegura que los datos se archiven con calidad óptima. Los croquis de apoyo, las fotografías de referencia y las comprobaciones de diversas dimensiones podrán utilizarse en futuras fases del proceso.

Generalmente, el objetivo debería ser conseguir una precisión en los resultados del registro diez veces menores que la precisión final requerida. Teniendo esto en cuenta, hay muchos otros elementos que podrían tener efecto en la precisión; así pues, lo mejor es intentar conseguir los mejores resultados posibles en el registro.

El siguiente diagrama proporciona información en lo que respecta al proceso de control de calidad en los levantamientos con escáner láser.

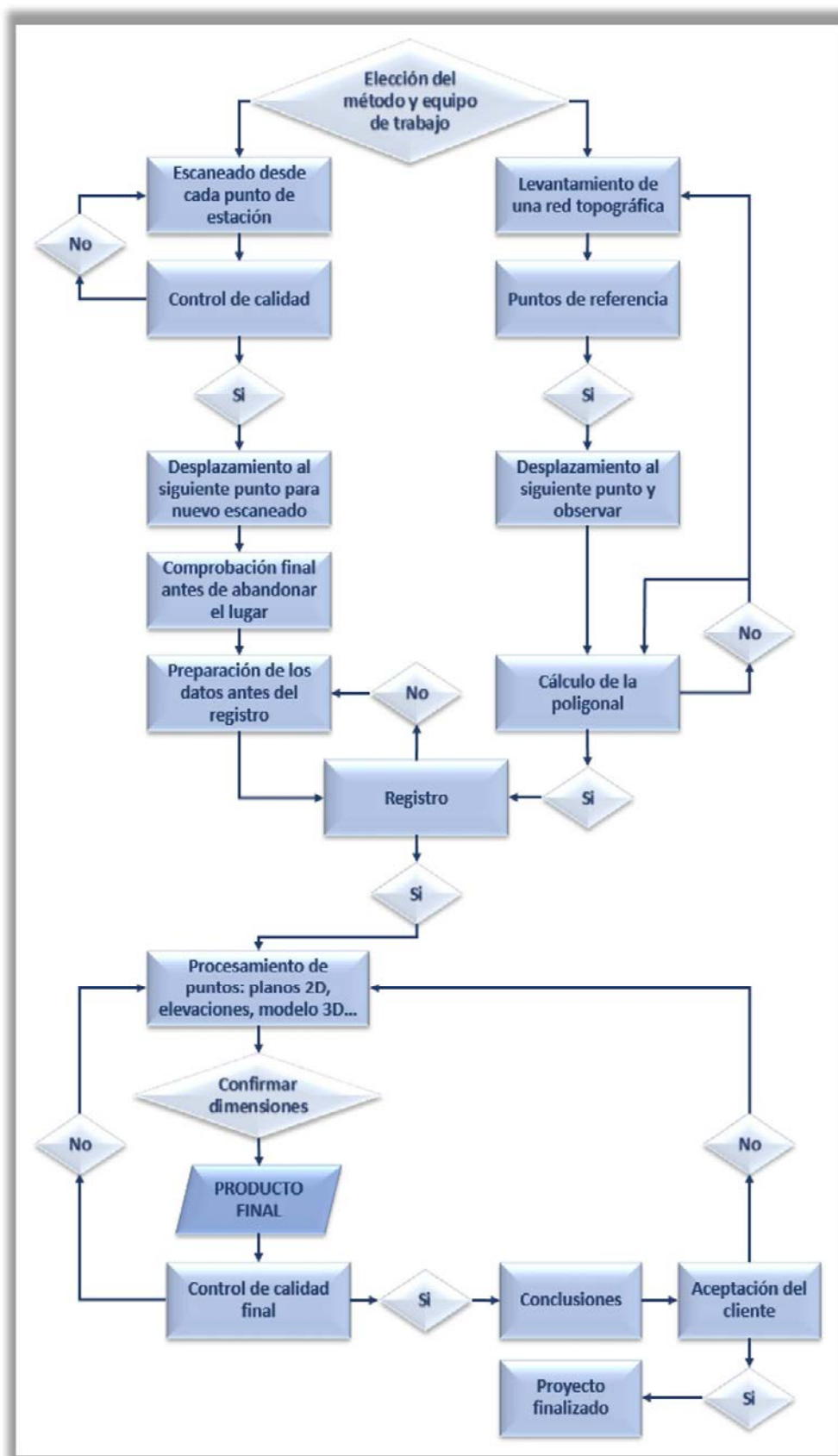


Ilustración 66. Proceso de control de calidad de los levantamientos con láser escáner.

## **4. CONCLUSIONES**

Como objetivo de este trabajo, se pretendía obtener un documento técnico, ordenado y claro que sirviera de referencia para futuros trabajos con tecnología láser escáner. Podemos confirmar, incluso antes de haber terminado la edición, que dicho objetivo se ha cumplido, ya que hay varias personas interesadas esperando a la publicación del mismo para poder utilizarlo en sus respectivos trabajos.

Es importante aclarar que éste es un documento que muestra las pautas generales de trabajo con equipos láser escáner terrestre, por lo que no se especifican todas las situaciones que puedan darse en un proyecto de este tipo. El usuario que haga uso de ellos debe ser un profesional con conocimientos, ya que así les dará un uso correcto y será capaz de resolver problemas que puedan surgir en el proceso.

La seguridad es otra cuestión a tener en cuenta, ya que, aunque la mayoría no son equipos peligrosos, hay que tomar ciertas precauciones con el láser.

Como todo proyecto de ingeniería, es imprescindible una buena planificación antes de comenzar, ya que, dependiendo de los resultados que se quieran obtener, se ha de elegir el equipo, y la técnica puede variar. Consecuentemente, el tiempo y el coste del proyecto serán distintos. Es de vital importancia tenerlo en cuenta, ya que son dos condicionantes muy importantes a la hora de asignar proyectos por parte del cliente. Una buena planificación conlleva a obtener buenos resultados.

Una buena cantidad y distribución espacial de los puntos de referencia dotarán al sistema de una geometría bien controlada y ajustada, por lo que hay que prestarle especial atención.

El procesado de los datos adquiridos mediante equipos láser escáner es una de las mayores limitaciones de esta tecnología. La gestión de la enorme cantidad de puntos de la nube se lleva la gran parte del tiempo dedicado a este tipo de proyectos. Es por ello que se hace imprescindible un buen equipo informático, tanto software como hardware, para optimizar el trabajo.

Junto al procesado de datos, el precio de los equipos es otra de las grandes limitaciones. El alquiler de alguno de éstos equipos ronda los 700€/día, y la adquisición hasta 150.000€. Sigue siendo una tecnología muy cara a la que pocas empresas u organizaciones pueden acceder.

En este trabajo se ha mostrado una pequeña parte de las aplicaciones de la tecnología láser escáner con la intención de que el lector pueda hacerse una idea de las grandes posibilidades que ofrece. Toda aquella situación que requiera un control espacial, dentro de los límites de precisión, puede ser resuelta por un equipo láser escáner. No obstante, como hemos visto, no es infalible, y la Topografía es imprescindible como base y complemento a esta tecnología para resolver todas las geometrías.

La evolución constante de la tecnología permite que los equipos sean cada vez más independientes y polivalentes para facilitar su manejo e intentar llegar al objetivo de dar soluciones únicas y exactas a la realidad. Es por ello que se hace necesario un aprendizaje constante de las técnicas por parte del profesional en Geomática y Topografía.

## **5. PRESUPUESTO Y CRONOGRAMA**



## 5.1. PRESUPUESTO

La elaboración de un presupuesto consiste en la valoración de los costes que se producen en la ejecución del trabajo. Para ello se han aplicado circunstancias similares a las que encontraríamos en una empresa privada.

Los costes se dividen entre costes directos e indirectos. Los costes directos son los generados por el proceso de realización del proyecto, como puede ser la mano de obra. Los costes indirectos son los necesarios para mantener una empresa en funcionamiento, como el alquiler de una oficina o los costes de administración. En este presupuesto los costes indirectos se han tenido en cuenta al calcular el porcentaje de beneficio del 15% del coste.

Los conceptos básicos en este presupuesto son:

- Mano de obra:
  - Graduado en Geomática y Topografía .....64 €/día
- Material:
  - Equipo informático completo con licencias de Windows 8 y Microsoft Office, y conexión a Internet.....13,44 €/día
  - Impresión y encuadernación .....15,14 €/unidad
- Desplazamientos:
  - Gastos por desplazamientos ..... 15,12 €/día de participación

Los costes según el desglose de tareas son:

Recopilación de documentación			
Concepto	Unidad	Coste unidad	Coste parcial
Mano de obra: Graduado en Geomática y Topografía	1	64	64
		Coste por día:	64
		Coste total (31 días):	<b>1.984 €</b>

Planificación de contenido			
Concepto	Unidad	Coste unidad	Coste parcial
Mano de obra: Graduado en Geomática y Topografía	1	64	64
		Coste por día:	64
		Coste total (2 días):	<b>128 €</b>

Edición			
Concepto	Unidad	Coste unidad	Coste parcial
Mano de obra: Graduado en Geomática y Topografía	1	64	64
Material: Equipo informático y licencias	1	6	13,44
		Coste por día:	77,44
		Coste total (16 días):	<b>1.239 €</b>

Participación en proyectos y demostraciones			
Concepto	Unidad	Coste unidad	Coste parcial
Mano de obra: Graduado en Geomática y Topografía	1	64	64
Gastos por desplazamientos	1	15	15,12
		Coste por día:	79
		Coste total (8 días):	<b>697 €</b>

Impresión y encuadernación			
Concepto	Unidad	Coste unidad	Coste parcial
Mano de obra: Graduado en Geomática y Topografía	0,5	64	32
Impresión y encuadernación	3	15,14	45,44
		Coste por día:	77,44
		Coste total (1 día):	<b>77 €</b>

Presentación del trabajo			
Concepto	Unidad	Coste unidad	Coste parcial
Mano de obra: Graduado en Geomática y Topografía	1	64	64
Presentación	1	47,14	47,14
		Coste por día:	111,14
		Coste total (3 días):	<b>333 €</b>

Y el coste total:

Actividad	Coste €
Recopilación de documentación	1984,00
Planificación del contenido	128,00
Edición	1239,04
Participación en proyectos y demostraciones	696,96
Impresión y encuadernación	77,44
Presentación del trabajo	333,44
Coste total:	<b>4.458,88 €</b>
Beneficio empresarial (15%)	668,83
I.V.A. (21%)	936,36
Coste total del trabajo:	<b>6.064,07 €</b>

Según se puede observar en el informe presupuestario, el coste total del trabajo asciende a seis mil sesenta y cuatro euros con 7 céntimos.

## **5.2. CRONOGRAMA**

El cronograma de actividades es la representación gráfica de los tiempos que demanda cada actividad y proceso durante la ejecución y operación del proyecto.

Es muy recomendable utilizar esta herramienta para hacer un seguimiento del trabajo y controlar los tiempos y los costes del proyecto, Para ello se hace un desglose de tareas y costes de acuerdo a la metodología establecida.

En la siguiente ilustración se muestra, mediante un diagrama de Gantt, la estructura seguida en la realización de este trabajo.

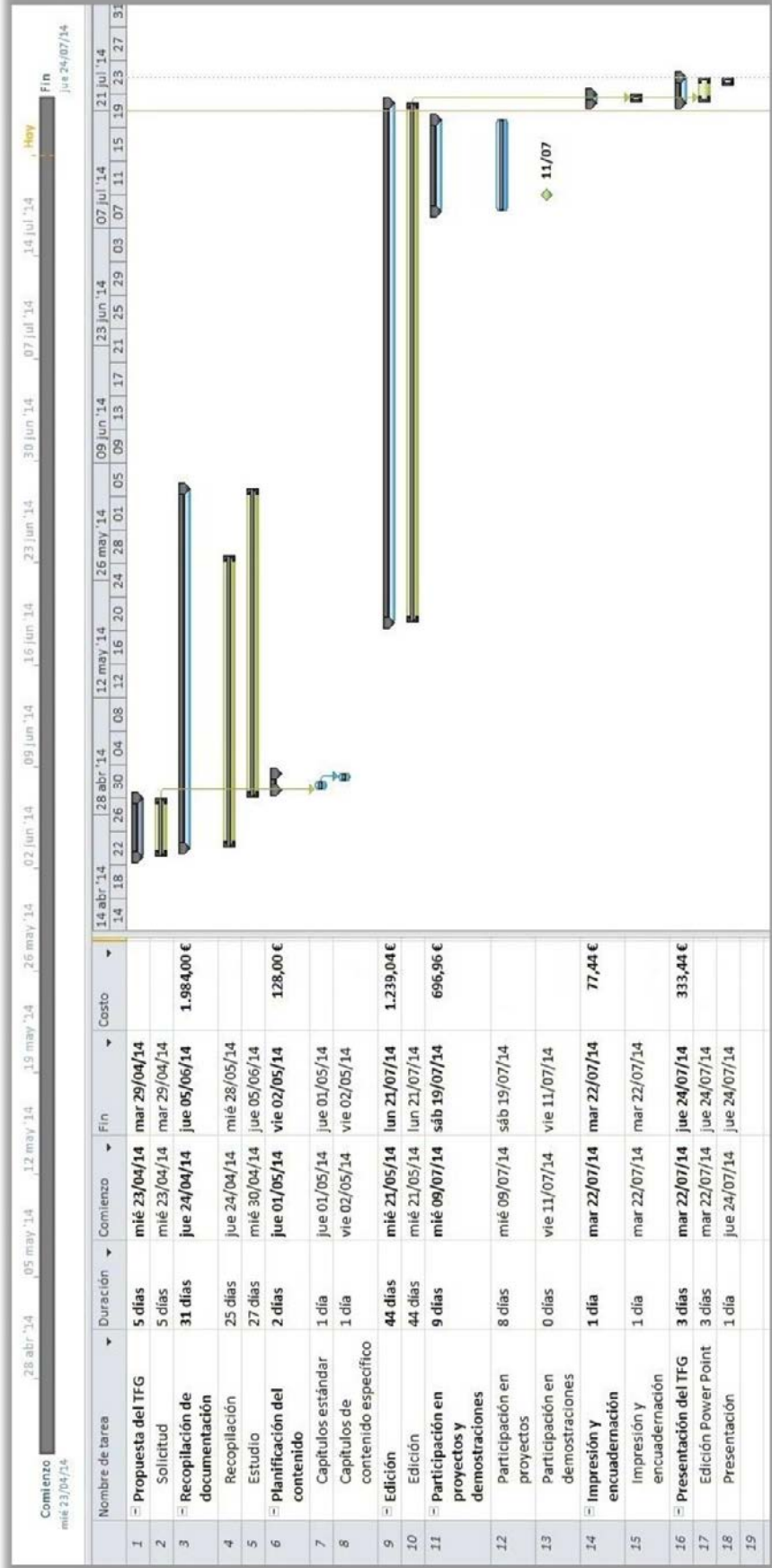


Ilustración 67. Diagrama de Ganti.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

- Ackerman, Friedrich; Kraus, Kart. (2005). *Pasado y futuro de los modelos digitales del terreno: mallas regulares y formato híbrido* [Fecha de consulta: 29 Abril 2014]. Disponible en:  
[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=905](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=905)
- Barcelo, J.A, Vicente, O. (2004). *Some problems in archaeological excavation 3D Modelling*. In Enter the Past. The e-way into the four Dimensions of Cultural Heritage. Edited by Magistrat der Stadt Wien-Referat Kulturelles Erbe- Stadtarchäologie-Wien. ArcheoPress, oxford (BAR, Int. Series 1227).
- Belart Rodríguez, Pilar; Ariza López, Francisco J. (2003). *Generalización de modelos digitales del terreno*. Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica Escuela Politécnica Superior Universidad de Jaén. [Fecha de consulta: 29 Abril 2014]. Disponible en:  
[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=294](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=294)
- Belton, David; Lichti, Derek D. (2006). *Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information*. Cooperative Research Centre for Spatial Information; Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology. [Fecha de consulta: 30 Abril 2014]. Disponible en:  
<https://modelisation-environnement-forestier.googlecode.com/files/segmentation%20classification%20variance.pdf>
- Blais, F. (2006). *Terrestrial Laser Scanning, in International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling"*. Aghios Nikolaos, Crete, Greece.
- Brenner, C. (2006). *Aerial laser scanning, in International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling"*. Aghios Nikolaos, Crete, Greece.
- Bryan, Paul; Blake, Bill; Bedford, Jon; Barber, David; Mills, Jon (2009). *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*. English Heritage. [Fecha de consulta: 27 Mayo 2014]. Disponible en:  
<https://www.english-heritage.org.uk/publications/metric-survey-specification/>
- Buide P., M<sup>a</sup> Concepción (Mayo 2008). *Levantamiento mediante láser escáner 3D de la fachada del Torreón de los Guzmanes, Ávila*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Buill Pozuelo, Felipe; Núñez Andrés, M<sup>a</sup> Amparo (2008). *Aplicación del láser escáner terrestre para levantamientos arquitectónicos, arqueológicos y geotécnicos*. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica Universidad Politécnica de Cataluña. [Fecha de consulta: 29 Abril 2014]. Disponible en:  
[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id\\_articulo=1472](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla.asp?id_articulo=1472).
- Escarpa Sánchez-Garnica, Francisco José. *Introducción a los sistemas de medición tridimensional con láser*. Santiago & Cintra.

- Finat, Javier. *Sistema láser de documentación 3D de patrimonio*. Grupo DAVAP. [Fecha de consulta: 26 Mayo 2014]. Disponible en:  
[http://www.ge-iic.org/docs/d\\_temasdei3D.pdf](http://www.ge-iic.org/docs/d_temasdei3D.pdf)
- Forte, M.; Dell'Unto, N.; Issavi, J.; Onsurez, L.; Lercari, N. (2012). *3D Archaeology at Çatalhöyük*. University of California, Merced, School of Social Sciences, Humanities and Arts; Department of Archaeology and Ancient History, Lund University. [Fecha de consulta: 25 Mayo 2014]. Disponible en:  
[http://www.academia.edu/2455431/3D\\_Archaeology\\_at\\_Catalhoyuk](http://www.academia.edu/2455431/3D_Archaeology_at_Catalhoyuk)
- García, Beñat; Díaz de Apodaca, Lorenzo; Seco, Andrés (2006). *Comparativa en coste y rendimiento entre las "tecnologías clásicas" y el escáner láser 3D de largo alcance en un proyecto concreto*. [Fecha de consulta: 29 Abril 2014]. Disponible en:  
[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1128](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1128)
- *Información escáneres de corto alcance*. [Fecha de consulta: 31 Abril 2014]. Disponible en:  
<http://www.ingecor.net/3dkonica.htm>
- Ing. Márquez, A. (2010). *Un tratado sobre el escáner terrestre TLS*. MECINCA. MSEE Columbia University. N.Y. [Fecha de consulta: 1 Mayo 2014]. Disponible en:  
<http://www.mecinca.com/papers/EscanerTLS.pdf>
- Jones, David M. (2011). *3D Laser Scanning for Heritage (second edition). Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. English Heritage. [Fecha de consulta: 24 Mayo 2014]. Disponible en:  
<https://www.english-heritage.org.uk/publications/3d-laser-scanning-heritage2/>
- Lerma García, José Luis; Biosca Tarongers, Josep Miquel (2008). *3D RiskMapping. Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas*. Vlaamis Leonardo Da Vinci Agentschap v.z.w. [Fecha de consulta: 23 Mayo 2014]. Disponible en:  
[http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo\\_Tutorial\\_Final\\_vers5\\_SPANISH.pdf](http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo_Tutorial_Final_vers5_SPANISH.pdf)
- Lichti, D., et al. (2002). *Comparison of digital photogrammetry and laser scanning*. Proc. Of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording.
- Mañana-Borrazza, P.; Rodríguez Paz, A.; Blanco-Rotea, R. (2008). *Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)*.
- Marambio A., García-Almirall, P. *Escáner láser: modelo 3D y ortoimágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa María del Mar en Barcelona*. [Fecha de consulta: 22 Mayo 2014]. Disponible en:  
<http://www-cpsv.upc.es/documents/SG7pap137.pdf>

- Martínez Morales, Jordi (2005). *Utilización de técnicas láser escáner y de fotogrametría terrestre para el estudio de desprendimientos de rocas. El caso de la zona de más riesgo del tren cremallera de Núria*. SERFOCAR S.C.C. [Fecha de consulta: 29 Abril 2014]. Disponible en:  
[http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=965](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=965)
- Matesanz Vicente, Jorge F. (Enero 2014). *Musealización de piezas arqueológicas mediante tecnología láser escáner 3D*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Mostaza Pérez, Teresa (1996). *Aplicación del escáner láser 3d a la documentación espacial de yacimientos arqueológicos*. [Fecha de consulta: 21 Mayo 2014]. Disponible en:  
[http://www.segeda.net/8cia/pdf/18\\_1\\_Teledeteccion\\_Mostaza.pdf](http://www.segeda.net/8cia/pdf/18_1_Teledeteccion_Mostaza.pdf)
- Patiño Vanegas, Alberto. *Técnica de triangulación láser para scanner 3D*. [Fecha de consulta: 20 Mayo 2014]. Disponible en:  
[http://www.fisica.ru/dfmg/teacher/archivos/Triangulacion\\_Laser.pdf](http://www.fisica.ru/dfmg/teacher/archivos/Triangulacion_Laser.pdf)
- Pfeifer, N. and C. Briese. (2007). *Laser scanning – principles and applications*. GeoSiberia
- Prieto Cañal, Roberto (Mayo 2008). *Levantamiento mediante láser escáner 3d de la fachada de la Iglesia de Santa Teresa, (Ávila)*". Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ruiz Marín, José (Mayo 2013). *Obtención del modelo tridimensional de dos fragmentos de globos de lava de la erupción volcánica submarina de la isla de El Hierro en 2011, mediante sistemas escáner láser 3D*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez Sánchez, Anselmo. *Empleo de barredores láser para la generación de modelos digitales geométricos precisos*. [Fecha de consulta: 19 Mayo 2014]. Disponible en:  
<http://www.topografiaglobal.com.ar/archivos/teoria/lasergrametria.pdf>
- Solera Arganda, Álvaro Aarón (Junio 2012). *Obtención del modelo tridimensional de una vasija precolombina de la Cultura Nazca-Perú mediante sistemas láser escáner 3D*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Tejado Sebastián, José María (2005). *Escaneado en 3D y prototipado de piezas arqueológicas*. [Fecha de consulta: 18 Mayo 2014]. Disponible en:  
<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2526197>



- Ulrich, Andreas; Studnicka, Nikolaus; Riegl, Johannes; Neubauer, Wolfgang. *3D-Laser-Sensors and their Applications in Archaeology and Modeling of Historic Buildings*. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH; VIAS Vienna Institute for Archaeological Science. [Fecha de consulta: 17 Mayo 2014]. Disponible en:  
<http://homepage.univie.ac.at/wolfgang.neubauer/php/schwarzenbach/?download=3dlaserscanner.pdf>
- UNED (2012). *Tecnología láser escáner y sistemas de información geográfica*. [Fecha de consulta: 16 Mayo 2014]. Disponible en:  
<http://www.rtve.es/alacarta/audios/uned/uned-tecnologia-laser-escanersistemas-informacion-geografica-22-10-12/1559068/>